



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

교육학박사 학위논문

내성천 하도의 장기 변화 분석

- 지형 및 지표피복을 중심으로 -

2018년 2월

서울대학교 대학원

사회교육과 지리전공

이 찬 주

내성천 하도의 장기 변화 분석

- 지형 및 지표피복을 중심으로 -

지도교수 김 종 욱

이 논문을 교육학박사 학위논문으로 제출함

2018년 2월

서울대학교 대학원

사회교육과 지리전공

이 찬 주

이찬주의 박사학위논문을 인준함

2018년 2월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

내성천은 최근까지 비조절하천의 특성을 유지해 온 모래하천으로서 고유의 경관과 문화재로 인해 사회적 관심을 받아왔다. 2016년 영주댐의 담수가 시작되어 조절하천이 된 내성천은 여타 댐 하류의 하천과 마찬가지로 하상 저하, 식생 활착 및 하폭 감소를 수반하는 지형 및 경관상의 변화를 겪을 것으로 예상된다. 그런데 이러한 변화는 기후, 유역의 토지 피복 및 하도에서의 인위적 교란 등의 지배요인 변화에 적응하는 과정으로서 비조절하천에서도 야기될 수 있는 것이다. 본 연구는 과거 100여년의 자료를 이용하여 비조절 상태에서 내성천의 변화를 지형 및 지표피복의 관점에서 분석, 고찰함으로써 지배요인과 하천 변화의 상호관계를 파악하며, 이를 통해 하천 관리의 방향을 제시하고자 한다.

이를 위해 1915~2013년의 공간 자료를 이용하여 내성천의 하도 형태에 대한 계량적 분석을 실시하였고, 그 결과 내성천에서는 1960년대 이후로 현재까지 하천 공간이 넓은 하류 R01, R03~R07 소구간을 중심으로 저수 주하도의 사행도 감소, 망류지수 증가, 하폭 감소, 하상 저하 등의 지형학적 변화가 나타났음을 확인하였다. 가장 두드러진 것은 하폭 감소와 하상 저하로서 직접적인 원인은 유사량 감소이며, 이는 주로 하상에서의 인위적 교란인 골재 채취와 산림 조성으로 인한 유역의 유사산출량 감소에 의해서 야기된 것으로 추정된다.

항공사진을 이용하여 1965~2016년간 내성천의 지표피복 변화를 분석하였으며, 그 결과 지표피복의 변화는 공간적으로는 하천 공간이 넓은 하류 R01, R03~R08 구간을 위주로 나타났고, 시기적으로는 i) 1986/87년 이전의 이른바 화이트리버 시기, ii) 1987년경에 시작되어 2013년까지

계속된 식생역 확대 시기, iii) 2013년 이후 상하류에서 모두 식생면적이 증가한 2차 확장기 등으로 구별되었다. 식생 면적의 확장은 i) 망류하도의 하중사주에 식생이 활착한 후 식생사주 및 하중도로 발달하는 과정, ii) 상대적으로 침수빈도가 낮은 하도 주변부에 식생이 활착되는 과정을 통해 이루어졌다. 1986/87년과 2016년의 식생 급증기는 비조절하천에서도 홍수가 약한 연도에 높은 봄철 기온과 함께 i)의 과정을 통해 식생 활착이 이루어질 수 있음을 보여주었다.

식생 활착으로 인한 지표피복의 변화에 관여하는 주요 원인을 정량적으로 평가하기 위해 다중회귀분석을 실시하였다. 그 결과 장마철인 6~7월 유량과 그 대체변수인 강우량, 그리고 식생의 초기 성장기인 4~6월 기온이 식생면적 증감에 영향을 미치는 주요 변수임을 알 수 있었다. 또한 1965년 하폭은 하류 구간(R01, R03~R08)과 상류 구간(R02, R09~R13)을 구분하는 지형학적 변수로 나타났다. 이러한 결과는 수문 변수는 식생 활착의 물리적 조건에 관여하는 방식으로, 기후 변수는 식생 성장의 생물학적 조건에 관여하는 방식으로, 지형 변수는 공간적 제약 조건으로 작용하여 식생 면적의 변화에 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다.

본 연구의 결과는 내성천이 수문학적 변동성과 넓은 하폭의 사질 망류하천으로서 수문-식생-지형의 상호작용이 활발하게 이루어져 왔음을 보여준다. 그러므로 바람직하고 지속가능한 하천 관리를 위해서는 이러한 상호작용에 대한 이해를 기반으로 관리 방안이 수립되어야 할 것이다.

주요어 : 내성천, 하천 변화, 하천 지형, 지표피복, 식생 활착, 하천 관리

학 번 : 2013-30438

목 차

1. 서론	1
1.1 연구의 필요성	1
1.2 연구의 배경과 목적	2
1.3 문헌 검토	3
1.3.1 국외 연구	3
1.3.2 국내 연구	11
1.4 논문의 구성	13
2. 연구 지역 및 방법	15
2.1 연구 지역	15
2.1.1 내성천의 개요	15
2.1.2 지질 및 지형	17
2.1.3. 기상 및 수문	20
2.1.4 연구의 시공간적 범위	22
2.2 연구 방법	24
2.2.1 공간자료 수집 및 분석	24
2.2.1.1 공간자료 수집과 정사영상 제작	24
2.2.1.2 위치 정확도 평가	30
2.2.2 하도 형태의 계량적 분석	31
2.2.3 지표피복의 분류와 지도화	37
2.2.4 다중회귀분석	39
2.2.4.1 종속변수	39
2.2.4.2 독립변수	42
2.2.4.3 통계분석 프로그램	47

3. 20세기 이후 내성천 하도의 지형학적 변화	51
3.1 결과 및 분석	51
3.1.1 평면적인 하도 형태 변화	51
3.1.2 활성하도 하폭과 하폭수심비	55
3.1.3 하상고 변화	60
3.1.4 하상재료의 변화	63
3.2 고찰	65
3.2.1 하폭 감소, 하상 저하, 그리고 상호연관성	65
3.2.2 변화의 공간적 차별성	68
3.2.3 변화의 원인	70
3.3 결론	73
4. 내성천에서 지표피복 변화의 시공간적 특징	75
4.1 주요 지점의 지표피복 변화 양상	75
4.1.1 경진교 주변(R04~R05)	75
4.1.2 고평교 주변(R07~R08)	78
4.1.3 오신교 주변(R10~R11)	80
4.1.4 수도권교 주변(R13)	82
4.1.5 상하류 구간의 시계열적 변화	84
4.2 고찰	86
4.2.1 식생역 확장의 과정과 시기적 변화	86
4.2.2 공간적 차이의 주요 요인	89
4.2.3 인위적인 교란의 영향을 받는 비조절하천에서의 지표 피복 변화	91
4.3 결론	92
5. 다중회귀분석에 의한 지표피복 변화 원인 분석	95
5.1 결과 및 분석	95

5.1.1 식생 면적 증감의 시계열적 특성	95
5.1.2 소구간별 다중회귀분석	98
5.1.3 전구간 다중회귀분석	105
5.2 고찰	107
5.2.1 여름철 홍수의 영향	107
5.2.2 기후 요인의 영향	108
5.3 결론	110
6. 종합 고찰 및 제언	113
6.1 연구 결과의 요약	113
6.2 종합 고찰 및 결론	114
6.2.1 사질 망류하천에서의 수문-식생-지형 연계성	114
6.2.2 비조절하천 연구의 의미	116
6.2.3 결론	117
6.3 하천관리상의 제언	118
참고문헌	121
Abstract	133
부록	137

표 목 차

Table 2-1 Main tributaries of the Naeseong Stream.	16
Table 2-2 Channel slope of the 13 sub-reaches based on 1984 survey data.	20
Table 2-3 Topographic maps, aerial photos and satellite images collected from various sources.	29
Table 2-4 Position accuracy of ortho-rectified aerial photos.	31
Table 2-5 Survey data used for width-depth ratio estimation.	36
Table 2-6 Types of riparian landscape unit.	38
Table 2-7 Pairs of years used for analysis on change of land surface cover.	40
Table 2-8 Definition of dependent variables.	41
Table 2-9 Variables used for sub-reach analysis.	43
Table 2-10 Drainage area of individual sub-reaches.	44
Table 2-11 Comparison of observed and estimated discharge based on the watershed area ratio for two gauging stations of the Naeseong Stream.	44
Table 2-12 Geomorphological independent variables.	46
Table 2-13 Climatic independent variables.	47
Table 3-1 Sub-reach sinuosity.	51
Table 3-2 Island-excluded width in 1965 and 2013 and reduction ratio	58
Table 3-3 Bed material size for 1984 and 2014.	65
Table 4-1 Proportion and shrinkage ratio of OWN and BAN.	75
Table 5-1 Multiple regression models for sub-reach based analysis.	100
Table 5-2 Relative importance of regressors in the three different	

models representing all sub-reach, downstream except R02 and upstream together with R02, respectively.	105
Table 5-3 Multiple regression models for whole-reach based analysis.	106

그 립 목 차

Figure 1-1 A simplified model of potential channel response (channel width) after a major flood in four different bioclimatic contexts.	11
Figure 2-1 Watershed and study reach of the Naeseong Stream.	16
Figure 2-2 Geological map of the Naeseong Stream.	17
Figure 2-3 Naeseong Stream at Hyeoryongpo.	18
Figure 2-4 Naeseong Stream near Miho Bridge.	19
Figure 2-5 Longitudinal profile and channel gradient of the Naeseong Stream.	20
Figure 2-6 Mean monthly temperature and precipitation of Yeongju.	21
Figure 2-7 Annual precipitation of Yeongju (1964~2016).	21
Figure 2-8 Daily discharge computed using water level data at Wolpo station.	22
Figure 2-9 Sub-reach division along the study reach.	23
Figure 2-10 Procedure for aerial photos ortho-rectification and geo-referencing.	26
Figure 2-11 Variables related to sinuosity.	32
Figure 2-12 Variables related to braiding index.	33
Figure 2-13 Cross-sections of different year and their corresponding reference points to compute width-depth ratio.	35
Figure 2-14 GUI and console screen of R.	46
Figure 3-1 Temporal change in low water channel sinuosity	52
Figure 3-2 Change of low water channel during 1954~2013	52
Figure 3-3 Change in braiding index (1954~2013).	54
Figure 3-4 Change in mean active channel width of 20 crossings for	

all sub-reaches during 1918~2013.	58
Figure 3-5 Change in width-depth ratio for downstream sub-reaches (R03~R05, R07).	60
Figure 3-6 Change in riverbed elevation during 1984~2001	61
Figure 3-7 Change in riverbed elevation during 1984/85~2010	62
Figure 3-8 Amount of recorded sand mining since 1988	63
Figure 3-9 Temporal change in bed material size	65
Figure 3-10 Valley width and ratio to 1965 width measured at 200 m spacing along the study reach.	69
Figure 3-11 Relationship of 1965 width with ratio of width decrease during 1965~2013 and braiding index of 2013.	70
Figure 3-12 Aerial photos indicating the contrastive condition of land cover in a mountain area near R03 in 1971 (upper) and 1996 (lower).	72
Figure 3-13 Decrease of non-stacked area and increase of forest accumulation in Gyeongbuk Province since 1950s. ...	73
Figure 4-1 A series of ortho-rectified aerial photos with layers of classified land surface cover of vegetation and cropland along sub-reach R04~R05 during 1965~2016	77
Figure 4-2 A series of ortho-rectified aerial photos with layers of classified land surface cover of vegetation and cropland along sub-reach R07~R08 during 1980~2016	79
Figure 4-3 A series of ortho-rectified aerial photos with layers of classified land surface cover of vegetation and cropland along sub-reach R10~R11 during 1980~2016	81
Figure 4-4 A series of ortho-rectified aerial photos with layers of classified land surface cover of vegetation and cropland along sub-reach R13 during 1980~2016	83
Figure 4-5 Temporal change in area ratio of different land surface	

cover types with increase of VGHT proportion compared to the previous period.	85
Figure 4-6 Relationship between annual rate of increase in VEG/VGT /HUC/HUP area and width of 1965.	90
Figure 5-1 Change in ENCR(red) and RECV(blue) according to year along the sub-reaches.	97
Figure 5-2 Temporal change of AC	98
Figure 5-3 A uni-variable regression model plot between AC and LQ _{JJK} for all sub-reaches	102
Figure 5-4 A uni-variable regression model plot between AC and L(Q _{JY} /W) for all sub-reaches	102
Figure 5-5 A uni-variable regression model plot between AC and LQ _{JJK} for downstream sub-reaches except R02	103
Figure 5-6 A uni-variable regression model plot between AC and T _{AJ} for upstream sub-reaches together with R02	103
Figure 5-7 A uni-variable regression model plot between AC and LQ _{tJJ} for whole reach in whole-reach analysis	106
Figure 5-8 Mean temperature of April to June in Youngju	109
Figure 6-1 Conceptual model describing channel morphology being governed by dynamic relationship between physical and vegetational processes	115

1. 서론

1.1 연구의 필요성

하천은 하곡 내에서 유수에 의한 침식, 퇴적 및 유사 이송이 일어나는 물리적 공간임과 동시에 수변 식생의 생활 터전으로서 그 형태와 경관은 수문-지형-식생 사이의 지속적인 상호작용에 의해 형성된다. 홍수는 하폭을 확대하고 식생을 제거하며, 유사량 증가는 하상 상승을 초래한다. 반면에, 유량과 유사량 감소는 하상 저하, 하폭 감소 등의 반응을 야기하며, 그 과정에서 일어나는 수변 식생의 활착은 유수와 상호작용 속에서 유사의 퇴적을 유도하며 이로 인해 하중도와 홍수터가 형성된다.

이러한 수문-지형-식생간의 상호작용은 그것에 영향을 미치는 보다 큰 지배요인인 기후, 수문, 유역의 토지피복 및 인위적인 교란 등의 영향을 받는다. 이러한 지배요인들은 정태적인 것이 아니라 시간 속에서 변동하므로 하천은 거기에 반응하고 조절되면서 변화된다.

이러한 의미에서 하천의 변화에 관한 연구는 하천과 그 지배요인들에 관한 역사적 분석 작업이라고 할 수 있다. 그 과정은 다양한 유형의 자료에 기록된 과거부터 현재까지의 하천 형상을 분석하고, 그 맥락을 파악하며, 변화의 원인을 탐구하는 것으로 이루어진다. 특히 지배요인과 결과하는 하도 형태 사이의 상호관계를 파악하는 일은 하천의 현재 모습에 대한 맥락적 이해에 기여하며 장래의 하천 변화를 예상하여 이를 관리하는데 활용될 수 있다. 이러한 이유로 하천 변화는 지형학의 주요 주제로서 일찍부터 다루어져 왔다(Schumm & Lichty, 1963).

이러한 중요성에도 불구하고 한국에서는 하천 변화에 관한 연구가 적

은 것이 현실이다(김용전과 이찬주, 2014). 이는 현대적인 하천 관리가 시작된 이후로 하천이 수자원 개발, 홍수 조절, 환경 관리와 같은 공학적 목적의 대상으로 취급되어 온데 그 원인이 있다고 할 수 있다. 댐과 같은 구조물의 현저한 영향을 받는 조절하천의 경우 그 변화에 대해 몇몇 연구가 이루어졌으나(Choi et al., 2005; 우효섭 등, 2010; 박봉진 등, 2008), 비조절하천의 변화는 연구 주제로서 충분히 주목받지 못하였는데, 이는 많은 하천들이 인위적 교란에 노출되었고, 교란이 없는 기간의 하천 변화는 상대적으로 현저하지 않은데 기인하는 것으로 보인다.

하지만 최근에는 하천 환경에 대한 관심이 높아지고 있고 하천의 자연성 유지가 중요시되고 있다. 또한 하천의 공학적 변경의 빈도가 낮아지거나 제약됨에 따라 수변 식생 활착이 수반되는 하천의 조절 과정이 점차 가시화되고 있다. 이는 하천에 대한 새로운 접근과 관리 방식을 필요로 한다. 이러한 상황은 비조절하천을 대상으로 하천 변화를 맥락적으로 파악하는 연구가 필요함을 의미한다. 왜냐하면 조절하천은 댐에 의한 인위적인 유량 조절과 유사량 차단이 하천에 미치는 영향이 현저하여 그 외의 지배요인의 영향을 분리해서 다루기가 어려운데 비해 비조절하천은 기후, 수문, 유역의 변화, 그리고 인위적 교란에 의한 하천 변화를 지배요인과 결과하는 하도 형태의 사이의 인과관계 속에서 보다 잘 이해할 수 있기 때문이다.

1.2 연구의 배경과 목적

한국 남동부 내륙에 소재한 내성천은 산지를 관류하는 모래하천으로서 최근까지도 거의 완전한 비조절하천의 특성을 유지해 왔다. 또한 회룡포

와 무섬마을, 선몽대 등 모래하천 고유의 지형 경관과 결부된 문화재가 산재하고 있으며 얇고 빠른 유수가 어우러진 모래 백사장은 친수성과 심미적 가치도 제공해 왔다. 하지만 2016년부터 영주댐의 담수가 시작되어 내성천은 조절하천(regulated stream)으로 바뀌었다. 일반적으로 댐에서는 유량이 조절되고 유사량은 차단되므로(Brandt, 2000) 댐 하류의 하천에서는 변화된 조건에 대한 반응으로서 하상 저하, 유로의 측방 이동성 약화, 식생의 활착과 수림화를 동반하는 하폭 감소 등이 일어난다(Williams & Wolman, 1984; Kondolf, 1997). 하지만 이러한 현상들 자체는 댐 하류의 조절하천에서만 나타나는 것이 아니며 유역의 변화와 하도에서의 인위적 교란에 대한 하천의 적응(adjustment) 과정으로서 비조절하천에서도 일어날 수 있다. 따라서 내성천에 대한 연구는 비조절하천에서 일어난 하천 변화를 이해할 수 있는 좋은 사례가 될 것이다.

이러한 배경에서 본 연구는 영주댐 담수 시점인 2016년을 기준으로 그 이전 100여 년의 기간을 대상으로 비조절 상태의 내성천이 겪은 하도의 장기적 변화를 분석하고 그 원인을 관련된 맥락과 함께 고찰하는데 그 목적이 있다. 구체적으로는 평면형태 및 종횡단형을 포함하는 하도형태학적 특성 변화, 그리고 하도와 홍수터에서의 지표피복 변화의 양상과 원인을 분석하고자 한다. 나아가 이를 통해 유수의 물리적인 프로세스와 식생 프로세스가 상호작용하여 지형이 형성 및 변화되는 공간으로서 하천에 대한 역사적, 맥락적 이해에 기여하고자 한다.

1.3 문헌 검토

1.3.1 국외 연구

하천의 변화에 관해서는 다양한 지역을 대상으로 많은 연구들이 수행되었다. 변화의 내용의 관점에서 크게 분류해 보면 다음과 같다. 먼저 하도의 평면적 형상인 하도 패턴(channel pattern) 측면에서는 하천의 사행 정도 및 측방 이동성의 변화를 들 수 있다. 이와 함께 망류하천으로부터 사행하천이나 방랑하천(wandering stream)으로의 변화 또는 그 반대 방향의 변화를 구분할 수 있다. 한 지점을 중심으로 하도의 형태학적 측면으로 보면 활성하도의 하폭 축소나 확대로 구분될 수 있는데 이는 종단적인 측면에서는 하상 저하나 하상 상승과도 관련된다. 또한 수변 식생의 활착 면적 증가나 감소 역시 하도의 패턴 및 하폭 변화와 관련된다.

사행 하천의 형태적인 변화에 관한 연구들은 다음과 같다. Gurnell & Downward(1994)은 영국의 River Dee의 사행 변화를 연구하여 과거 115년간 평면 형태의 변화는 매우 작게 일어났지만 하류 방향으로의 이동성은 감소했다고 하였다. Hooke & Redmond(1989)는 영국에서 하도 변화에 관한 여러 연구를 종합하여 많은 하천들이 변화의 정도는 다르지만 유로를 변경하였고, 사행도의 감소 또는 증가의 변화를 겪었음을 파악하고 하천 변화가 광범위하게 일어났음을 확인하였다.

망류하천에서 사행 또는 방랑하천으로의 변화에 대한 연구를 살펴보면 Hohensinner et al.(2004)은 오스트리아 Machland 지역의 다뉴브 강 25 km 구간을 분석하여 1810년대에는 수역과 사주 및 하중도가 어우러진 망류하천으로서 복합적인 수변 공간을 가졌으나 직강화와 유량 조절의 영향으로 하도는 단순해지고 사주와 식생하중도는 90% 이상 감소하였다고 분석하였다. Gordon & Meentemeyer (2006)는 미국 캘리포니아 Russian강 수계에 속한 Dry Creek를 연구하여 댐 건설 후 강턱흐름의 영역과 하폭이 감소하면서 망류하도는 사행하도로 변화되었다고 하였다.

이와 함께 하도의 길이가 감소하고 수변식생의 면적이 증가하는 변화가 함께 발생하였음을 보고하였다. Surian(1999) 이탈리아 Piave 강의 Piedmont 지역에 있는 선상지에 대해 14세기 이후의 변화를 조사하여 하천의 망류도가 3.0 수준에서 1.5 수준으로 감소하였고 방랑하천으로 변화되었다고 분석하였다. 그는 Piave 강이 1920년까지는 거의 자연적인 변화를 겪었으나 1920~1950년 사이에 변화의 정도가 다소 증가하였고, 1950년부터 1990년대까지는 광범위하게 변화가 진행되었음을 지적하였다. 그리고 이러한 변화가 댐, 분기수로, 골재채취, 호안, 수제 등 인공적 시설물 건설과 관련하여 발생하였다고 보았다. Sedell & Froggatt(1984)는 습윤지역인 미국 워싱턴주의 망류하천인 Willamette강을 분석하여 1850년대 이후로 점차 분기 유로가 감소하였음을 보고하였다. Schumm & Lichty(1963)는 미국 Kansas 주의 반건조지역에 있는 모래하천인 Cimarron 강을 분석하여 대규모 홍수를 전후로 나타난 하천 변신(metamorphosis)으로 보일만한 현저한 하천 변화와 그 이후의 홍수터 형성 과정을 통한 하폭 감소 과정을 분석한 바 있다. Cimarron 강은 1914년 이전에는 초지로 덮인 홍수터를 가진 사행하천이었으나 1914년에 발생한 대홍수로 인해 하폭이 15 m에서 300 m 이상으로 크게 증가하였고 1942년까지 그 상태를 지속하였으나 그 후로는 수목 식생이 활착하면서 홍수터가 형성되며 하폭이 감소하였다. VanLooy & Martin(2005)은 동일한 Cimarron 강을 2000년대까지 분석하여 1950년대 이후로 계속적인 하폭 감소가 일어나서 1953년에 101~213 m 였던 하폭이 2001년에는 31~41 m까지 축소되어 1914년 이전과 같은 사행하천으로 변화되었다고 보고하였다. 이러한 변화는 대홍수의 충격에 반응하는 하천의 적응 과정이 느리게 진행되는 건조지역의 특성에 기인한다(Baker, 1977; Friedman et al., 1996a). 유사한 연구로서 Burkham(1972)은 건조지역인 미국

Arizona 주의 Gila강을 조사하였다. 그는 1904년 이전에는 Gila 강이 46~91 m의 하폭을 가지는 사행하천이었다가 1905~1917년 기간의 대홍수로 홍수터가 파괴되면서 하폭은 약 610 m까지 증가하였다고 하였다. 하지만 1918~1970년 동안에 홍수터가 재건되면서 하폭이 다시 61 m로 축소되었다고 보고하였다. 이러한 일단의 연구들과 관련하여 Osterkamp & Hedman(1981)은 반건조 대평원지역에서는 댐 하류에서 하도의 변화가 주로 하폭 감소와 측방 이동성 약화라는 양식으로 나타난다고 주장하였다. Marston et al.(1995)은 프랑스 남동부 Ain강에 대해 분석하여 1930년 이전에는 망류하천이었다가 최근에는 사행하천으로 변화하였고, 하상은 1~3 m가 저하되었으며, 하도의 수평이동이 약화되었다고 분석하였다. Boix-Fayos et al.(2007)은 스페인의 Rogativa 유역에서 1950년 이후로 밀생 산림이 5배 증가하는 등 유역의 식생 피복이 크게 증가하였고, 건조지 경작의 감소가 일어남에 따라 활성하도 하폭은 좁아졌고 측면의 하주는 식생 활착이 발생하였다고 함으로써 유역의 지표피복 변화가 하도 형태에 미치는 영향을 분석하였다.

이와는 반대로 홍수로 인한 하폭 확대와 망류하도 형성에 초점을 둔 연구들도 있다. Chang(1986)은 미국 Arizona 주 Santa Cruz 강의 간헐하천(ephemeral stream)에서 1983년 홍수 때에 대폭적인 하폭 증가가 발생한 후 망류하도로 바뀐 현상을 보고하였다. Friedman et al.(1996a) 미국 콜로라도 동부의 모래하천인 Plum Creek에서 1965년에 900년 빈도의 대홍수(Matthai, 1969)가 발생하여 단일 유로인 하폭 26 m의 하천이 하폭 116 m의 망류하천으로 변화하였음을 보고하였다. 하지만, 이 하천 역시 하폭 감소가 1973년부터 시작되어 1991년까지 지속되었는데, 1983년에는 47 m까지 감소하였다(Hupp & Osterkamp, 1996). Nardi & Rinaldi(2015)은 온대습윤 지역에 속하는 이탈리아 Magra 강에서 30~

200년 빈도에 해당하는 대규모 홍수로 인해 연구 구간 34 km에서 유의한 확폭이 발생하였다고 분석하였다. 홍수 전 기간인 1860년부터 1990년대까지 하폭이 지속적으로 감소하였지만, 홍수로 인해 기존 하폭으로부터 3~90 %까지 증가하였다. 그리고 하폭의 증가는 하곡의 제약이 없는 망류하도 구간에서 더 크게 나타났다.

하도의 형태학적 특성 변화에 관한 연구를 살펴보면, Rinaldi(2003)는 중부 이탈리아의 53개 하천을 분석하여 하상 저하의 정도를 심각(3 m 이상), 보통(2 m), 미약(1 m 이내)로 구분하면서 하폭의 축소가 동시에 발생하였다고 하였다. 특히 망류하천과 방랑하천의 경우 하폭 감소에 비해 하상 저하는 상대적으로 적은 것으로 나타났으나 사행하천의 경우 하폭 축소 비율이 상대적으로 적으면서 하상 저하는 더 많이 일어났음을 지적하였다. 그리고 이러한 변화는 2차 대전 후 복구사업에 소요되는 골재 채취, 댐 건설, 호안 등의 공사 등의 인위적 요인에 기인한 것으로 보았다. Warner(2000)는 프랑스 Durance 강에 대해 과거 100년간의 지도를 분석하여 하폭과 침투유량, 유사량이 감소함을 보고하였는데, 이는 자연적으로는 소빙기 이후 유량 감소와 1940년대 이후의 강우량 감소에 기인하며, 인위적으로는 호안, 홍수 방어를 위한 댐 건설, 유량 분기, 사면의 산림 조성 등에 기인한 것으로 분석하였다. Liebault & Piegay(2001)는 인간의 간섭이 적은 프랑스 Roubion 강을 조사하여 하상폭(bed width)이 감소하면서 하상 저하가 발생하였으며, 장갑화가 진행되고 거석의 비중이 증가함에 따라 분급이 불량해졌다고 보고하였다. 그리고 그 주된 원인으로는 1950년대 이후 산림 조성으로 인한 유사량 감소를 들었다. Williams(1978)은 반건조지역인 미국 Nebraska 주에서 모래하천인 Platte 강을 조사하여 댐 건설 이후 코튼우드(cottonwood) 식생의 활착으로 인해 하폭은 1,000 m 이상에서 200 m 이내로 대폭 감소하였고, 망

류도가 감소하였음을 보고하였다. Platte 강은 구간의 역사적 강둑(historical bank), 기반암 노출 등의 지형학적 제약에 따라 하천 공간의 폭이 달라지며, 그에 따라 구간별로 사행하천, 이류하천(anastomosed), 망류하천이 혼재하는 특성을 보였다(Fotherby, 2009). Cadol et al.(2011)은 건조지역인 미국 Arizona 주의 Canyon De Chelly 국립기념물을 관류하는 하도를 조사하여 지난 70년간 91 m 폭의 망류하도가 6.5 m의 하폭을 갖는 단일하도로 변하였으며, 식생이 캐년 꼭저의 45%를 차지하였다고 분석하였다. Swanson et al.(2011) 미국 New Mexico 주 Rio Grande 강을 조사하여 1880년대에는 기후 변화, 1960년대 이후로는 댐 건설 영향으로 하폭이 감소하였다고 보고하였다. 그리고 다른 여러 연구들을 종합하여 건조, 반건조 지역에서 하폭 감소가 일반적 경향이라고 주장하였다. 이는 반건조 대평원 지역에서 평균 35%의 하폭 감소와 사행하천의 측방 이동을 감소를 지적한 Friedman et al.(1998)의 연구와도 맥락을 같이한다. Andrew(1986)는 미국 Colorado 주에 있는 감입사행하천인 Green 강을 조사하여 댐 건설 이후로 105 마일 하류의 관측소에서 유사량은 약 54% 감소하였으나 하폭은 약 10% 정도만 감소하였다고 보고하였는데, 이는 하곡의 제약이 하도 형태의 변화에 미치는 영향을 시사하는 사례라고 할 수 있다. Liebault & Piegay(2002)는 프랑스 남동부 60여개의 대소 규모 하천을 지중해성, 알프스 지역, 중위도습윤 등 지역을 포괄하여 분석하였고, 지역과 관계없이 전반적인 하폭의 감소가 있었음을 확인한 바 있다. 그리고 수목의 연륜 측정을 통해 수변 식생의 이입 연대가 1950~70년대 사이인 것으로 보고하였다. Winterbottom(2000)은 스코틀랜드 지역의 Tay 강을 조사하여 하폭의 감소 현상을 확인하였다. Gendaszek et al.(2012)은 미국 Washington 주 Cedar 강을 조사하여 댐 건설, 호안, 유량 분기 등의 복합적인 원인으로 인해 하폭이 감소하였

음을 보고하였다.

지형학적인 관점에서 발생한 하천의 변화는 식물 생태, 지표피복 및 경관 관점에서는 식생의 활착 과정으로 볼 수 있다. Toda et al.(2012)의 경우 일본 중부 지역의 하천에 대해 최우도법 기반의 항공사진 자동 분류 방법을 적용하여 식생 면적변화를 분석하였다. Tenryu 강의 경우 1960년대에 식생으로 피복된 하천 공간 내 지표의 영역은 10 % 미만이었으나 2000년대에는 25 %에 달하였고, 목본의 비율은 40 % 정도라고 분석하였다. 이러한 변화는 댐이 있기는 하지만, 연최대유량의 변화가 거의 없는 상황에서 이루어진 것이다. 이와 함께 일본 중부 지방의 8개 A 급 수계 하천을 대표적으로 분석하여 하천 내 나지는 감소하고 초본 및 목본의 면적이 크게 증가하였다고 하였다. 즉 식생의 피복율은 1950년대 10 % 미만에서 2000년대 15 % 이상까지 점진적으로 증가하였다. 이러한 연구와 함께 일본 내 많은 하천에서 식생역의 확대가 이루어지고 있음을 보고하였다. Johnson(1994, 2000)은 미국 Nebraska 주 Platte 강에서의 연구를 통해 수변지대의 버드나무류 수목의 활착은 6월 유량에 의해 조절된다고 보았으며, 댐 건설 이후로는 평균 7년에 1회 꼴로 식생활착을 억제하는 홍수가 발생한다고 하였다. 그는 유식물의 생존여부가 여름 유량에 의한 침식과 매몰, 겨울철 유빙에 의한 재구조화에 달려있다고 보았다. Corenblit et al.(2011)은 프랑스 Tech 강을 사례로 1942년부터 2000년까지 변화를 분석하여 1942년 대홍수 이후에 식생역이 지속적으로 증가하였으며, 수변 지역에서는 천이가 단계적으로 관찰된다고 보았다. Marston et al.(1995)은 프랑스 남동부의 자갈하천인 Ain강을 대상으로 100년 빈도의 홍수터를 대상으로 경관모자이크 변화를 분석한 결과 사주와 개척식생지는 감소하고 연목-경목혼합수림이 증가하며, 인위적 이용지 역시 증가하였다고 보았다. 그리하여 과거에 펄스의 영향을 받는 홍

수터가 최근에는 육상형 홍수터로 변화되었다고 하였다. Azami et al.(2004)은 일본 Arakawa 강의 하천 경관 변화를 통해 식생 면적이 증가하였음을 보고한 바 있다.

종합적으로 볼 때, 20세기 이후로 발생한 하천 변화의 양상을 요약하면 다음과 같다. 대규모 홍수는 기후 지역에 따라 그 정도와 속도는 다르지만 하폭의 확대를 일으키며, 그 이후 안정화 기간(relaxation time)에서 식생의 이입, 활착 및 천이 과정이 진행되면서 점진적으로 홍수터가 조성되어 하폭은 감소한다(Schumm & Lichty, 1963; Birkham, 1972; Friedman et al., 1996a; Corenblit et al., 2011; Nardi & Rinaldi, 2015). Figure 1-1은 이러한 변화를 기후 지역별로 나타나는 충격의 크기와 이후 적응 단계에서 일어나는 식생 프로세스의 강도에 따른 안정화 과정을 모식적으로 보여준다. 홍수와 같은 일회성, 펄스형의 충격은 아니지만 유사한 조절 과정이 댐 건설과 인위적 하천 정비(Williams, 1978; Gordon & Meentemeyer, 2006; Rinaldi, 2003; Gendaszek et al, 2012), 그리고 불량한 산림 피복이 산림 조성에 의해 개선되어 유역 유사 산출량이 감소하는 경우에도(Warner, 2000; Liebault & Piegay, 2001; Boix-Fayos et al., 2007) 일어날 수 있다. 이 경우에도 하도의 유사량이 감소하여 하상은 저하되고 하폭은 감소하며 하도의 망류성향과 사행과장의 감소를 수반하는 유로의 측방 이동성(lateral mobility) 감소가 나타난다.

아울러 이러한 변화는 하곡의 제약성이 적은 하천에서 제약된 하곡을 가진 하천에 비해 뚜렷이 나타나는 것으로 볼 수 있다. 이는 하곡의 규모 자체가 하천의 변화가 일어날 수 있는 공간을 결정짓기 때문이다.

하도에서의 식생 활착을 하폭 감소에 수반되는 현상으로 이해할 경우, 20세기 이후의 하폭 감소의 경향성은 미국 반건조 지대, 습윤 지대, 그리고 유럽(영국, 프랑스, 이탈리아, 스페인 등), 일본 등 북반구 중위도의

여러 지역에서 공통적으로 확인되는 현상으로 볼 수 있으며, 그러한 변화는 기후 변화와 같은 자연적 요인과 산업화, 치수 사업 등의 인위적 요인이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다.

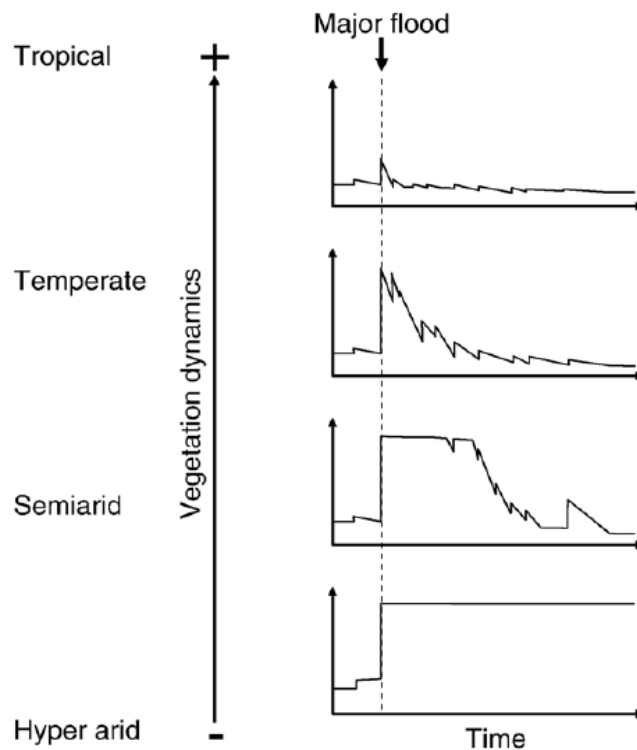


Figure 1-1 A simplified model of potential channel response (channel width) after a major flood in four different bioclimatic contexts (modified from Knighton, 1998).

1.3.2 국내 연구

하천 변화의 주제에 대해서 국내에서도 몇몇 연구가 이루어진 바 있다. 댐 건설 후의 하천 변화로서 식생의 활착과 하폭의 감소에 대해서 Choi et al.(2005)은 모래하천인 황강을 대상으로 연구를 수행한 바 있다.

황강댐의 건설 후에 15년 동안 지속적으로 식생이 활착되어 그 비율은 2.3~3.4%에서 59~80%로 대폭 증가하였다. 이에 따라 하폭도 역시 감소하였다. 우효섭 등(2010) 낙동강을 대상으로 댐 건설 후 하류 하천에 발생한 식생활착 과정을 분석하였으며, 안동댐과 추가 건설된 임하댐에 의한 유량 조절이 낙동강의 식생 활착에 가장 중요한 요인임을 확인하였다. 박봉진 등(2008)은 국내 십여 개소 이상의 댐 하류 하천에 대해 댐 건설 전후의 하천을 비교하는 연구를 수행하였으며, 이를 변화 지수로 평가하였다. 그 결과 전반적으로 댐 하류에서 식생 활착이 증가하였음을 확인하였다.

이와는 사뭇 다른 각도에서 수행된 연구들도 있다. 하천 변화를 연구한 사례 중에서 홍일 등(2012)은 만경강을 대상으로 분석하여 1929~1938년간 이루어진 직강화 공사로 인해 사행도가 감소하고 인위적으로 절단된 구하도가 형성되었음을 보여주었다. 또한 제외지 하천 공간에서 나지 사주는 감소하고 식생 사주가 증가하였음을 확인하였다. 박근애 등(2005)은 경안천을 대상으로 1910년대의 고지도와 항공사진 등을 이용하여 하천변 토지이용 및 유로의 변화를 분석한 바 있다. 이 연구에서도 나지사주의 감소가 보고되었다. 이민부 등(2005)은 북한 지역의 대동강과 재령강의 하도 변화를 위성영상을 이용하여 분석한 바 있으며, 이광률과 김대식(2011)은 본 연구와 같은 내성천을 대상으로 측량 자료의 단면을 분석하여 하상 저하를 확인하였으며, 그 원인을 골재 채취로 판단한 바 있다.

전반적으로 볼 때, 댐 건설로 인한 변화와 인위적인 하천 개수와 정비에 의한 것을 제외하면 하천의 장기적 변화에 관해 국내에서 수행된 연구는 적은 편이다. 이는 한편에서는 하천이 홍수 방지 목적으로 지속적으로 개수되는 과정에서 하도가 자연 상태의 변화를 겪기 보다는 빈번한

인위적 교란 및 정비로 인해 외견상의 하천 변화가 억제되는데 기인한다. 또한 이러한 영향으로 인해 일부 하천에서 나타나는 변화 역시 장기적인 하천의 적응 및 지형 변화 과정으로 이해되기보다는 일시적인 변화로 간주되어 제대로 다루어지지 못하는데 기인하는 것처럼 보인다. 이러한 국내의 배경이야말로 내성천에서 일어난 하천 변화를 보다 더 객관적으로 분석하고 고찰해야 할 이유라고 할 수 있겠다.

1.4 논문의 구성

본 논문에서는 내성천 하도에서 나타난 지형 및 지표피복의 장기적 변화에 대한 분석 및 고찰을 위해 다음의 순서로 연구 내용을 전개하였다.

먼저 2장에서는 연구 지역으로서 내성천의 개괄적인 특성을 서술하였다. 내성천의 수계와 유역, 지질 및 지형, 기후와 수문 특성을 통해 하천 변화가 일어난 수문지형학적 배경을 기술하였다. 아울러 3~5장에서 내성천의 변화를 분석하는데 사용한 연구 방법을 공간 자료의 수집과 분석, 지표피복 분류, 통계적 분석 방법을 중심으로 상세하게 기술하였다.

3장에서는 하도형태학적 관점에서 1910년대 이래로 약 100여 년간 나타난 내성천의 변화를 계량적으로 분석하고 그 원인을 고찰하였다.

4장에서는 1960년대부터 2016년에 이르기까지 내성천의 지표피복에서 나타난 변화의 시공간적 특성을 분석하고 그 과정을 고찰하였다.

5장은 4장에 나타난 지표피복의 변화를 보다 정량적으로 분석하기 위해 다중회귀분석을 적용하였으며, 그 결과를 분석하고 고찰하였다.

마지막으로 6장에서는 본 연구의 결과들을 요약하고, 내성천의 지형 및 지표피복 변화를 수문-지형-식생의 연계성 측면에서 종합적으로 고

찰한 후 결론을 도출하였으며, 아울리 하천관리 방안을 제안하였다.

2. 연구 지역 및 방법

2.1 연구 지역

본 연구는 내성천을 대상으로 수행되었다. 내성천은 영주댐의 담수가 시작되기 전인 2016년까지는 거의 전구간이 자연 상태의 수문 특성을 가진 이른바 비조절하천(unregulated river)이다. 이하에서는 내성천의 특성을 상술하였다.

2.1.1 내성천의 개요

내성천은 제1지류 하천으로 경북 봉화군 물야면 오전리에서 발원하여 경북 예천군 용궁면 향석리에서 낙동강에 유입한다(Figure 2-1). 법정 유로연장은 108.20 km로 지방하천 구간(시점~월포수위관측소)은 80.29 km, 국가하천 구간은 27.91 km이다.

내성천 유역은 소백산맥 남쪽의 경북 북부 내륙에 위치하는데 행정 구역은 봉화군, 영주시, 예천군, 문경시와 안동시 일부가 포함된다. 유역면적은 1,814.7 km²로 낙동강 전체 유역의 약 7%를 차지한다. 주요 지류는 상류에서부터 합류 순서로 보면 낙화암천, 토일천, 영주서천, 옥계천, 석관천, 한천, 금천 등이다(Table 2-1).

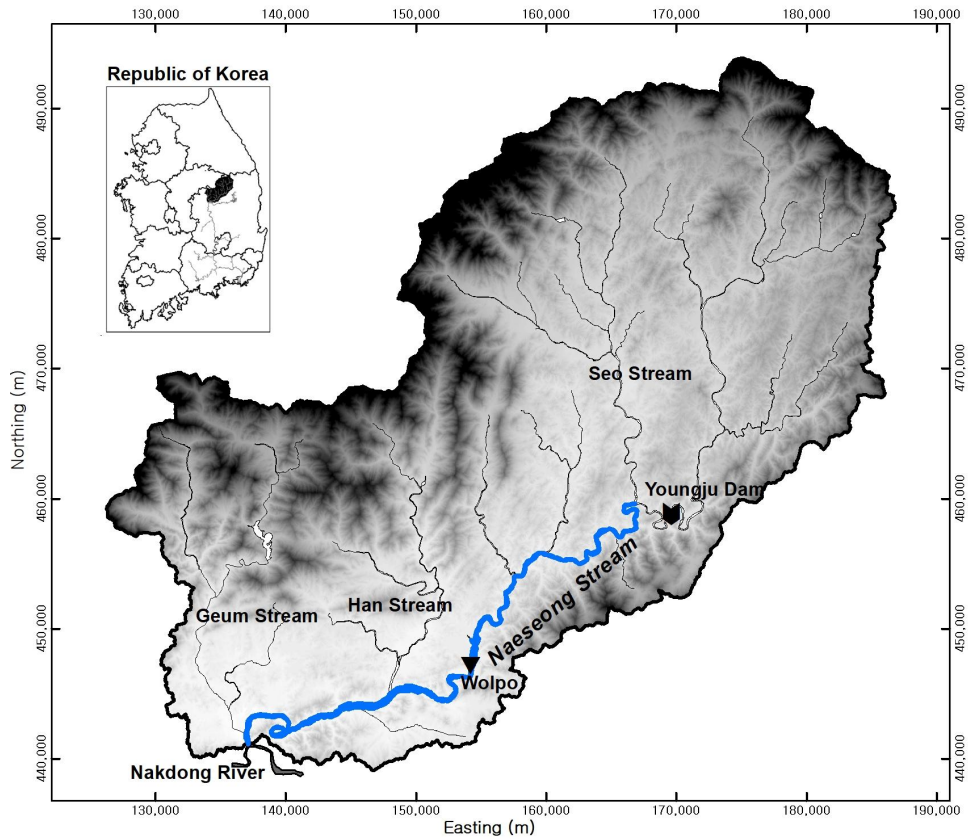


Figure 2-1 Watershed and study reach of the Naeseong Stream.

Table 2-1 Main tributaries of the Naeseong Stream.

Tributary	Watershed area (km ²)	Remark
Nakhwaam Stream	94.9	Upstream of Youngju Dam
Toil Stream	115.9	"
Seo Stream	364.6	Downstream of Youngju Dam(study reach)
Okgye Stream	84.1	"
Seokwan Stream	67.4	"
Han Stream	256.4	"
Geum Stream	286.0	"

2.1.2 지질 및 지형

지질은 대보화강암 (53.3%)과 소백산편마암류(Figure 2-2에서 PCE 계통) (27.0%) 등이 80% 이상을 차지하고 기타 퇴적암(고생대의 조선누층군과 평안누층군, 중생대 백악기의 경상누층군) 등이 분포한다. 한천 합류 후의 하류 일부 구간에는 하천을 따라 단층대가 분포한다(Figure 2-2).

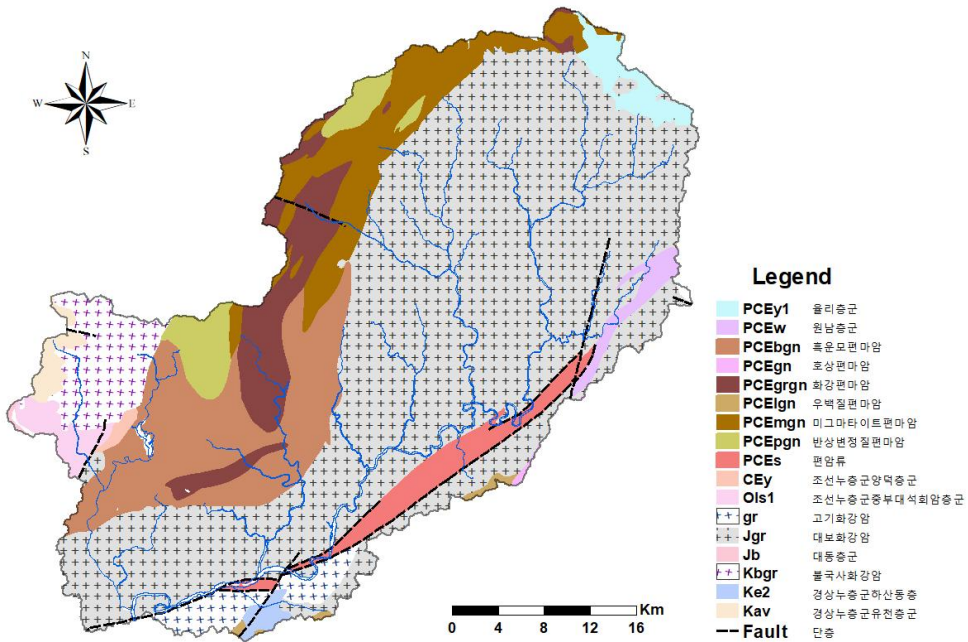


Figure 2-2 Geological map of the Naeseong Stream.

내성천 유역의 북부는 소백산지를 이루고 있고 유역면적의 대부분을 차지한다. 그에 비해 남부는 유역면적은 협소한데, 낙동강 유역과의 분수계를 이루는 학가산, 보문산 등의 산지와 호명면 일대의 구릉지가 있다. 내성천 유역의 분수계는 1,000 m 이상의 고도를 갖지만, 곡저 및 하상의

고도는 50~200 m 정도로 유역분지의 기복차이가 큰 반면 하도는 매우 완만하다(이광률과 김송현, 2009).

내성천은 하곡이 좁은 산지하천의 특성을 나타낸다. 하곡의 폭은 하폭의 1.5~3배에 불과하여 하도의 자유로운 수평 이동이 제약되어 있다. 좁은 하곡은 만곡부에서 더 두드러지는데 영주댐 부근의 평은면(금광리, 용혈리)과 문수면(수도리, 탄산리, 조제리), 그리고 신월리, 형호리, 대은리(회룡포, Figure 2-3) 등은 주요한 만곡부이다. 그 외의 구간에서는 하곡은 상대적으로 직선상으로 발달하였고(Figure 2-4), 하류의 고평리, 원곡리, 동송리, 상월리 구간에서는 비교적 하곡의 폭이 넓다. 연구 구간의 평균 하곡사행도는 1.4이다.



Figure 2-3 Naeseong Stream at Hyeoryongpo (bend reach).



Figure 2-4 Naeseong Stream near Miho Bridge (braided straight reach).

연구 구간의 하상재료는 모래가 90.8~99.5%를 차지하며, 그 외에는 일부 자갈이 섞여 있다. D_{50} 은 1.1~1.5 mm인데 1984년 이후로 거의 동일하다. 내성천은 1910년대에도 모래하천의 특성을 지녔던 것으로 보고되어 있고(조선총독부, 1920), 1950년대 이래로 항공사진 역시 모래하천의 경관을 보여주고 있으므로 적어도 지난 100여 년간 모래하천의 본질적인 특성을 유지해 왔다고 볼 수 있다.

내성천의 종단곡선도는 Figure 2-5와 같다. 하구로부터 상류 약 85 km까지는 비교적 완만하며, 모래하천의 특성을 나타내고 있고, 그보다 상류로는 자갈하천 구간으로서 고도가 가파르게 증가한다. 하상경사는 85 km 지점까지는 대체로 0.002 미만이며, 그 이상에서는 급격하게 증가한다. 연구 구간인 하구로부터 52 km 지점(서천 합류점)까지의 하도경사는 0.0008~0.0015 이다(Table 2-2).

Table 2-2 Channel slope of the 13 sub-reaches based on 1984 survey data.

Sub-reach	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	R09	R10	R11	R12	R13
Channel slope (%)	0.090	0.085	0.110	0.109	0.114	0.102	0.107	0.115	0.130	0.146	0.128	0.132	0.168

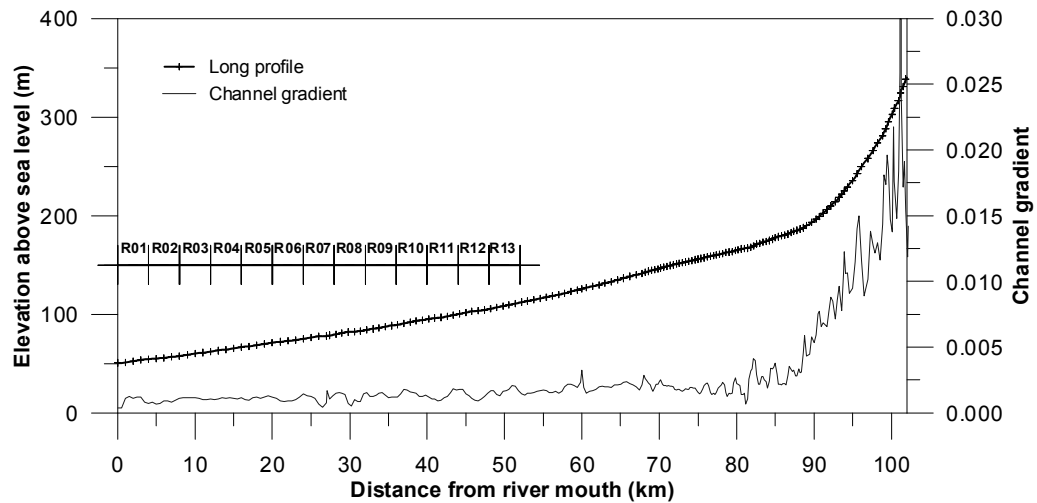


Figure 2-5 Longitudinal profile and channel gradient of the Naeseong Stream

2.1.3. 기상 및 수문

내성천 유역에 기상관측소는 영주, 문경, 봉화 관측소가 있다. 영주관측소를 기준으로 연평균기온은 11.1~11.9 ℃이며(Figure 2-6), 최근에는 기온이 증가하는 추세이다. 2015년의 연평균기온은 12.5 ℃로 44년간의 기상관측 기간 중에 최고 기온을 나타냈다.

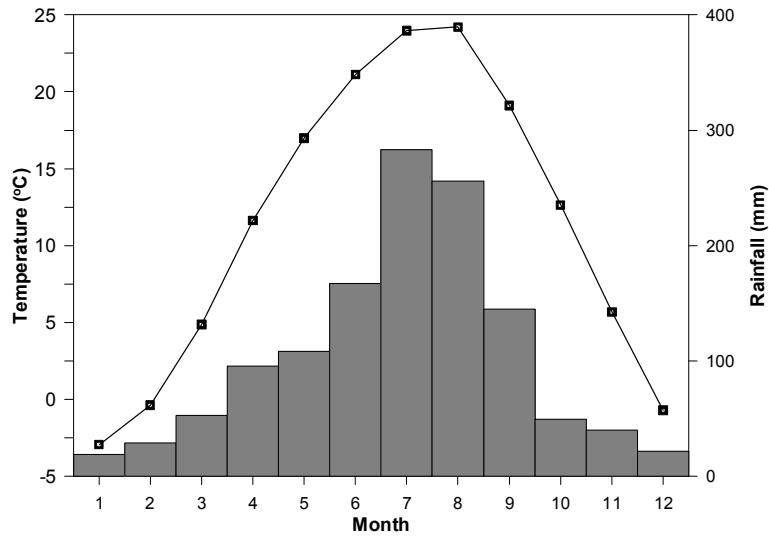


Figure 2-6 Mean monthly temperature and precipitation of Yeongju.

연평균강수량은 영주관측소가 1,230.8 mm, 문경관측소가 1,238.1 mm, 봉화관측소가 1,190.3 mm이며, 2000년대초까지는 강수량이 증가하였다가 최근 들어 감소하는 추세를 나타내고 있다(Figure 2-7).

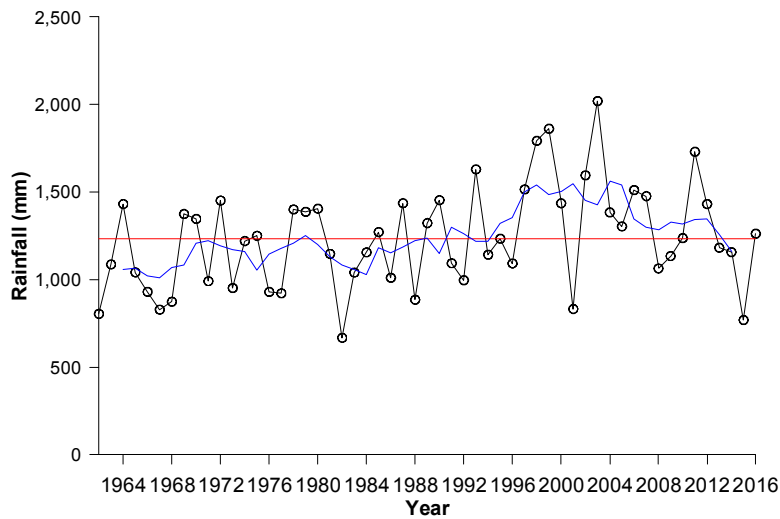


Figure 2-7 Annual precipitation of Yeongju (1964~2016).

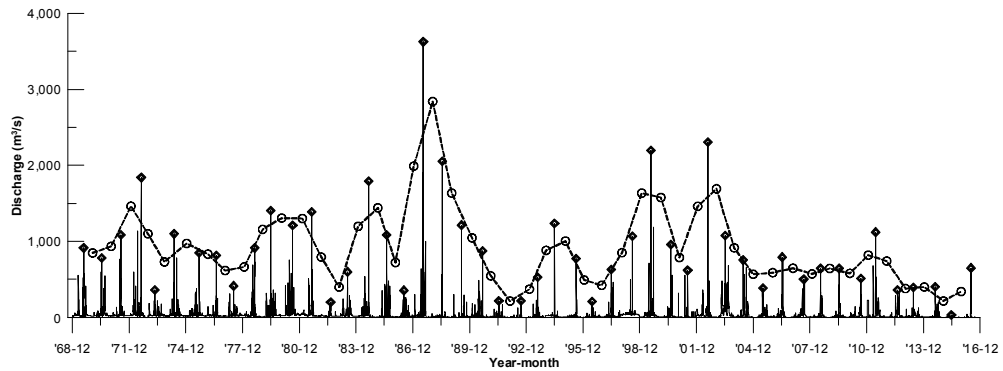


Figure 2-8 Daily discharge computed using water level data at Wolpo station.
Dashed line means 2-yr moving average.

수문관측소는 동로, 부석 등의 우량관측소와 봉화, 송리원, 조제, 미호, 월포, 죽전, 향석, 월호 등의 수위관측소가 있다. 그 중에서 가장 장기간의 양호한 수위 기록을 보유하고 있는 관측소는 월포 수위관측소이다. 월포 관측소는 1969년부터 수위 자료를 보유하고 있으며, 본 연구에서는 기수립된 수위-유량 관계와 실측된 유량측정 자료를 이용하여 Figure 2-8과 같이 일유량 시계열 자료를 구축하였다.

2.1.4 연구의 시공간적 범위

내성천의 장기 변화를 분석함에 있어 대상이 되는 시간적 범위는 1915년부터 2016년까지 대략 100년간이다. 다만 장에 따라 분석에 가용한 자료의 범위로 인해 연구 기간이 다르다. 3장의 경우 전기간을 다루며, 4장과 5장은 각각 1954~2016년, 1970~2016년의 기간을 대상으로 한다.

본 연구의 공간적 범위인 연구구간은 내성천 중하류 52 km 구간이다. 상류단은 서천 합류점이며, 하류단은 하구(낙동강 합류점)이다. 연구 구간은 하천 지형과 지표피복의 분석 및 객관성 있는 통계 분석을 위해 13

개의 4 km 길이 소구간으로 균등 분할하였다(Figure 2-9). 구간의 명칭은 하류로부터 상류까지 R01~R13으로 정하였다.

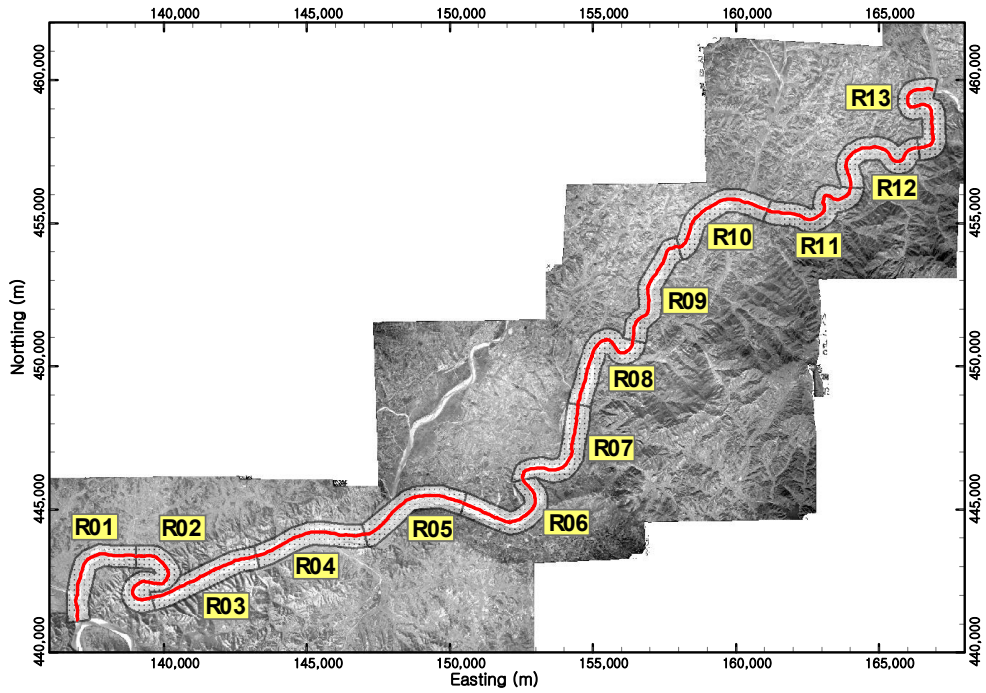


Figure 2-9 Sub-reach division along the study reach.

2.2 연구 방법

2.2.1 공간자료 수집 및 분석

2.2.1.1 공간자료 수집과 정사영상 제작

본 연구에서는 과거의 하천 지형 및 지표피복을 분석하기 위해 지형도, 항공사진 및 위성영상 등 다양한 공간자료를 수집하였다.

본 연구에서 분석의 기본이 되는 자료로서 다양한 출처의 항공사진을 취득하여 수집하였다. 이는 하천 변화를 포함한 지리 및 환경 연구 분야에서 과거 항공사진의 활용도가 넓어지고 있기 때문이다(Clery et al., 2014). 각종 아날로그 항공사진은 국토지리정보원, 한국임업진흥원 등에서 이미 보유한 흑백 양화필름을 1,200~1,800 dpi의 고해상도로 자체적으로 스캔한 디지털 이미지 파일을 취득하였고, 디지털 카메라로 촬영된 컬러 항공사진은 (주)삼아항공에서 취득하였다(Table 2-3).

아날로그 항공사진은 박근애 등(2004)을 참고하여 정립한 Figure 2-10의 절차를 통해 정사보정을 실시하고 다른 자료와 함께 좌표등록을 실시하였다. 정사보정을 위해 항공사진 및 각종 문헌(Karabork et al., 2000; Lue, 1996)에서 확인할 수 있는 정보를 토대로 카메라 모델, 초점거리, 주점 및 기준점(fiducial) 표시의 좌표 등 내부 표정정보를 수집하여 정사영상 변환 프로그램에 반영하였다. 그리고 내성천 유역에 대한 30 m급 수치표고모델과 좌표등록이 된 2013년 디지털 정사항공사진(공간해상도 픽셀당 0.25 m급)을 기준 자료로 이용하여 영상 대 영상 방식으로 외부 절대표정을 실시하였다. 이 때 기준 및 비교가 되는 영상의 양쪽에서 확인할 수 있는 도로, 논밭경계, 교량, 오래된 건물 등을 지상기준점

(ground control point)으로 활용하였다. 지상기준점은 항공사진 1매당 6~12개를 선정하되 하천의 좌우안을 고려하면서 영상 전체에 고르게 분포하도록 선택하였으며, 평균제곱근 위치 오차는 1 픽셀(pixel) 이내가 되도록 하였다. 그리고 최근접 이웃(nearest neighbor) 방식으로 픽셀당 0.5 m의 지상해상도를 갖도록 재표본화(resampling)를 실시하였으며, 지형도와 마찬가지로 한국동부원점 좌표계로 변환하여 등록하였다.

1954년 항공사진의 경우 정사보정의 기준인 2013년 영상과는 현저한 시기상의 차이가 있어서 정사보정에 필수적인 공통 지상기준점을 찾기가 어려우므로 직접 비교하여 보정을 실시하지 못하였다. 그 대신 2013년 영상을 기준으로 1차적으로 정사보정한 1970/71년 항공사진을 기준으로 삼아 2차적으로 정사보정을 실시하였다. 또한 1954년 항공사진은 기준점 표시(fiducial mark) 등의 내부 표정 정보가 없으므로 지상기준점만을 이용하여 다항식 모델(polynomial model)에 의한 기하학적 보정만을 실시하였다. 그 외에 모든 디지털 항공사진은 정사영상이며, 취득시 이미 동부원점 좌표계로 등록되어 있으므로 별도의 작업은 수행하지 않았다.

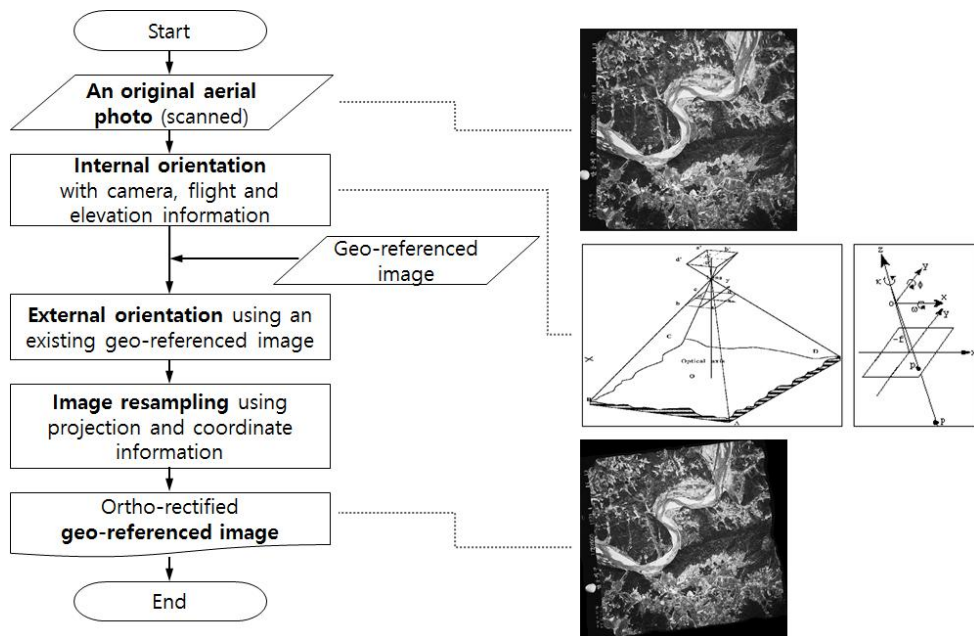


Figure 2-10 Procedure for aerial photo ortho-rectification and geo-referencing.

항공사진이 포괄하지 못하는 1960년대와 2000년대 초반의 시기에 대해서는 위성영상을 수집하였다. 1960년대의 위성영상은 미국에서 냉전시대에 운영하던 첩보영상인 CORONA 위성의 자료를 1995년에 해제하여 일반에 공개한 것으로(송영선, 2005), 과거의 영상으로서는 고해상도의 것이다(McDonald, 1995). CORONA 영상은 지상에서 150 km 상공에서 파노라믹 카메라에서 70 mm * 757 mm (29.8 인치) 롤 형태의 아날로그 필름으로 촬영된 것인데, 지상해상도는 최대 2m에 달한다(김기홍 등, 2006). 본 연구에서는 미국 USGS에서 CORONA(KH-4A) 위성의 영상을 3,600 dpi로 스캔하여 제공하는 것을 EarthExplorer(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)를 통해 구입하였다.

CORONA 영상 자료는 1970/71년 항공사진을 정사보정한 영상을 이용하여 1차 다항식 기법으로 정사보정을 실시하였다. 내성천 연구구간 전

체는 좁고 긴 띠 모양의 영상 2매에 다 포함되어 있는데, 파노라마로 촬영한 영상의 특성상 주변부 왜곡이 심하므로 한 번에 보정할 경우 주변부의 왜곡이 심해질 것으로 판단하였다. 그 대신 영상을 짧게 여러 개로 분할한 후 각각의 영상에 대해 6~10개의 지상기준점을 이용하여 정사보정을 실시하였다.

2000년을 즈음한 시기의 위성영상은 한국항공우주연구원에서 제공하는 KOMPSAT-1 위성의 영상을 입수하였다. 이 영상은 지상해상도가 픽셀당 6.6 m로 다른 자료에 비해 낮다(Kressler et al., 2006). 하지만, 이는 내성천에서 1996년과 2005년 사이의 기간에 활용할 수 있는 자료로서 가치가 높으므로 사용하였다. KOMPSAT 위성영상은 역시 2013년 디지털 정사영상을 이용하여 역시 1차 다항식 기법으로 6~10개의 지상기준점을 이용하여 기하학적 보정을 실시하여 사용하였다.

1965년과 2000년의 위성영상은 항공사진에 비해 해상도가 낮다. 이에 따라 정사보정시 지상기준점과의 정밀한 비교가 불가능하므로 교차로와 같은 상대적으로 큰 지형지물을 지상기준점으로 활용하였다. 이러한 한계를 고려하여 본 연구에서 1965년, 2000년의 위성영상은 위치나 크기의 정확도가 덜 중요한 분석을 위주로 사용하였다. 그리고 2000년대 초의 식생 등의 판독을 위해서는 추가적으로 GoogleEarthTM에서 제공하는 컬러 위성영상을 참고하였다.

마지막으로 항공사진 및 위성영상이 없는 더 오래된 시기의 내성천 지형 특성을 분석하기 위해서 고지도 및 과거의 지형도를 수집하여 사용하였다. 고지도는 1915년 조선총독부에서 편찬한 근세한국오만분지일지형도로서 도폭은 예천, 안동, 영주 등 3매이다(Table 2-3). 이는 국내 최초로 근대적인 지도제작방법에 의해 한반도의 전역을 대상으로 동일한 축척으로 제작되었고, 근대적인 의미의 토목공사가 시작되기 이전에 제작되어 구한말 우리나라의 모습이 반영되어 있다(배선헌, 2007). 이와 함께 해방 후 자료로는 육군측지부대에서 1956/57년, 국립건설연구소에서 1963년에 발행한 축척 1:50,000 지형도를 참고로 활용하였다.

이들 지형도는 먼저 1200 dpi 이상의 해상도로 스캔하여 디지털 이미지로 변환한 후에 도곽점에 있는 경위도 좌표를 이용하여 고지도 좌표등록에 활용되는 방법 중 하나인 러버 쉬트(Rubber sheet) 기법(White & Griffin, 1985; Shimizu & Fuse, 2003)으로 기하보정을 실시하였다. 그 다음으로 WGS84 또는 GRS80 타원체의 한국동부원점 평면직각좌표계를 기반으로 등록하여 GIS를 통해 다른 시기의 자료와 비교할 수 있도록 하였다. 디지털 이미지로 변환된 지형도의 픽셀 당 지상해상도는 2m이다.

과거의 지형도는 현재의 정확한 지도나 항공사진과 비교할 수 있는 지상기준점을 찾기 어려운 관계로 위치 정확도는 직접 평가하기 어렵다. 다만 지형도가 경위도 기반으로 제작되어 있으므로 좌표에 기반하여 다른 자료와 비교하는 데는 무리가 없을 것으로 판단된다.

Table 2-3 Topographic maps, aerial photos and satellite images collected from various sources. Abbreviated sources are as follows: National Geographic Information Institute of Korea(NGII), United States Geological Survey(USGS), Korean Aerospace Research Institute(KARI), Korea Forestry Promotion Institute(KOFPI).

Year	Type	Color	Pieces	Scale or ground resolution	Source
1915	Topographic map	Panchromatic	3	1/50,000	NGII
1954	Aerial photos (analog)	"	30	1/20,000	"
1957	Topographic map	Color	3	1/50,000	"
1963	"	"	3	"	"
1965	Satellite images-CORONA (analog)	Panchromatic	2	2.74 m/px	USGS
1970/71	Aerial photos (analog)	"	13	1/37,500	NGII
1974	"	"	35	1/15,000	KOFPI
1979	"	"	45	"	"
1980	"	"	12	1/20,000	NGII
1986/87	"	"	35	1/15,000	KOFPI
1988	"	"	19	"	NGII
1991	"	"	11	1/20,000	"
1995	"	"	22	"	"
1996	"	"	31	1/15,000	KOFPI
2000	Satellite images-KOMPSAT1 (digital)	"	1	6.6 m/px	KARI
2005	Aerial photos (analog)	"	11	1/20,000	NGII
2008	Aerial photos (digital)	RGB	47	0.25 m/px	Samah Co.
2010	"	"	47	0.25 m/px	"
2013	"	"	47	"	"
2016	"	"	47	"	"

2.2.1.2 위치 정확도 평가

기하학적으로 보정한 정사영상은 전체 구간에서 좌우안을 번갈아 고르게 추출한 검사용 기준점 20여개와 비교하여 정확도를 평가하였다. 기준점은 주로 오래된 가옥이나 사당, 갈림길 등으로 2013년과 과거 영상을 비교하기 쉬운 지점을 기준으로 하였다. 다만, 1954년 항공사진의 경우 2013년과 가옥 비교가 불가능하여 토지 구획이 확실한 경지 경계를 기준으로 비교하였으며, R09~R12 네 개 구간에만 영상이 있는 관계로 비교한 점의 개수는 8개이다(Table 2-4). 특정한 연도의 항공사진에서 ± 10 m 내외의 위치 오차가 발생하기도 하였으나 RMSE로 계산하면 동서방향의 오차는 1.37~4.42 m, 남북방향의 오차는 1.44~4.3 m 정도로 위치 오차는 2.33~6.16 m이다. 이러한 오차는 기존의 몇몇 연구(Wang & Ellis, 2005; Hughes et al., 2006)에서 보고된 항공사진 정사보정에 관련된 오차의 범위와 비교해 볼 때 적절한 수준인 것으로 판단된다.

위성영상(1965년, 2000년)은 지상의 사물의 정확한 위치를 상호 비교하기에는 해상도가 낮은 관계로 정확도 평가를 하지 않았다. 2008년 이후의 디지털 정사항공영상의 경우 국토지리정보원의 정사보정 정확도 기준을 만족하는 자료이므로 별도의 정확도 평가는 실시하지 않았다.

Table 2-4 Position accuracy of ortho-rectified aerial photos.

Year	No. of reference points	Position error (m)				
		Range X	Range Y	RMS X	RMS Y	X&Y
1954	8	-6.73~7.43	-8.35~5.95	4.42	4.30	6.16
1970/71	20	-8.51~6.04	-8.61~4.99	4.24	3.66	5.60
1974	21	-7.12~4.88	-3.28~4.30	3.54	2.60	4.39
1979	21	-3.27~3.12	-2.94~2.64	1.83	1.44	2.33
1980	20	-8.05~9.02	-4.96~5.21	3.50	2.41	4.25
1986/87	20	-3.06~2.11	-4.39~3.67	1.37	1.95	2.39
1988	20	-6.70~4.73	-7.71~3.60	2.81	2.52	3.77
1991	20	-5.61~2.71	-5.31~3.10	2.23	2.40	3.27
1995	20	-4.43~4.02	-10.03~3.64	2.14	2.80	3.53
1996	20	-3.33~4.92	-4.08~4.94	2.33	1.97	3.05
2005	20	-6.27~6.27	-4.11~3.14	2.71	2.02	3.38

2.2.2 하도 형태의 계량적 분석

지형학적 관점에서 내성천의 하도 변화를 살펴보기 위해서 동일한 좌표에 등록된 지도, 항공사진, 위성영상 등의 공간자료를 활용하여 GIS를 이용하여 사행도, 망류지수, 하폭 등 하도의 형태적 특성을 측정하거나 계산하였다. 또한 하천기본계획과 항공 LiDAR 측량 자료를 이용하여 하폭수심비를 계산하고 하상고의 변화를 분석하였다.

사행도. Mueller(1968)는 하곡의 지형적 특성을 배제하고 하천의 수리학적인 영향만을 반영하기 위해 하곡사행도(topographical sinuosity)와 수리사행도(hydraulic sinuosity)의 개념을 분리하여 제시한 바 있다. 유사한 맥락으로 본 연구에서는 하곡이 사행하는 내성천의 특성을 고려하

면서 하곡 내부에서 저수시 주하도의 사행 특성을 파악하기 위한 지표로 하곡사행도와 저수 주하도 사행도를 구별하여 사용하였다.

먼저 각 구간에서 지형학적인 사행인 하곡사행도를 계산하고 또한 수리학적인 의미를 갖는 저수 주하도의 사행도를 별도로 계산하였다. 하곡 사행도(SI_V)는 Eq. 2-1과 같이 정의하였다.

$$SI_V = \frac{\text{valley length}}{\text{air distance}} \quad (2-1)$$

여기에서는 소구간의 시종점 직선거리(4 km)를 Eq. 2-1의 직선거리(air distance)로 사용하였다. 하곡사행도는 연도와는 무관한데, 이는 하곡은 연구 기간 동안 변화가 없기 때문이다. 또한 저수 주하도의 사행도(SI_{MC})는 Eq. 2-2와 같이 정의하였다.

$$SI_{MC} = \frac{\text{channel length}}{\text{valley length}} \quad (2-2)$$

여기에서 하도 길이(channel length)는 특정 연도의 저수 주하도 중심선 길이이다. Figure 2-11에는 사행도 계산에 관계되는 변수의 정의가 제시되어 있다.

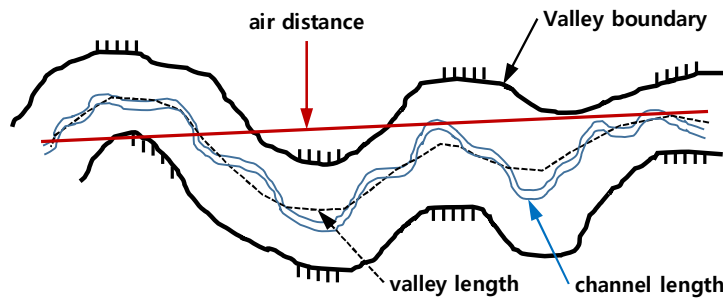


Figure 2-11 Variables related to sinuosity (modified from Richards(1982)).

망류지수. 망류지수(braiding index, BI)는 하도의 어느 정도의 분기하는 유로를 가지며 얼마나 많은 수의 하중사주(mid-channel bar) 또는 하중도를 가지는가를 나타내는 지수이다. 망류지수는 다양한 연구자들이 고안한 바 있으나(Brice, 1964; Rust, 1978; Mosley, 1981; Ashmore, 1991), 본 연구에서는 Williams(1978)가 사용했던 방법을 기초로 산정하였다(Eq. 2-3).

$$BI = \frac{\text{sum of island length}}{\text{channel length}} \quad (2-3)$$

내성천은 모래하천으로서 식생이 활착하지 않은 하중사주는 흐름 조건에 따라 일시적으로 형성되고 변형되며 없어지기도 한다. 따라서 항공사진에 의한 분석은 촬영 시점의 유량 조건의 영향을 많이 받아 변동성이 그대로 반영된다. 본 연구에서는 식생이 활착한 사주의 형성에 의한 망류지수 변화에 초점을 맞추고 있으므로 다년생 식생이 밀집하게 활착한 하중사주와 하중도만을 지수 산정에 반영하였다. Figure 2-12는 망류지수를 산정하는 방법을 보여준다.

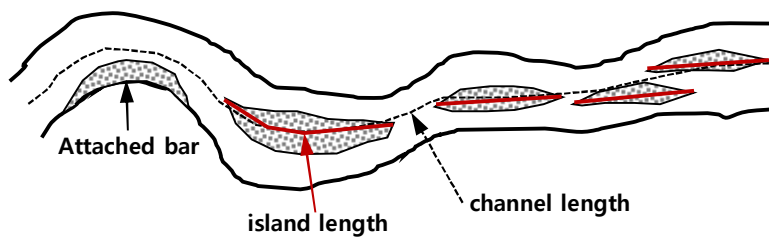


Figure 2-12 Variables related to braiding index.

활성하도 하폭. 연도별 항공사진을 이용하여 1970/71년의 하천 중심선을 따라 각 소구간에서 종방향으로 200 m 간격으로 연도별 비교가 가능하도록 동일한 위치에서 활성하도의 하폭(active channel width)을 측

정하였다. 소구간의 하폭은 20개 내외의 측정값의 평균, 최대, 최소값을 구하여 사용하였다. 항공사진으로 하폭을 측정할 때는 기존의 여러 연구(Williams, 1978; Winterbottom, 2000)를 참고하여 다음의 기준을 따랐다. 수면과 나지사주, 산발적인 초본 식생이 활착한 사주는 하도로 보아 하폭에 포함하였다(Hervouet et al., 2011; Toone et al., 2014). 수면과 목본 식생의 경계는 하폭 경계로 판단하였다. 밀집된 영구적 초본 영역과 목본 활착지, 경작지 등은 모두 홍수터로 보아 하폭에서 제외하였다. 지도의 경우 영상에 의한 판독이 불가능하므로 약간 다른 기준을 적용하였다. 1915년, 1957년 지도에서 모래/자갈밭으로 표시된 부분은 나지사주로 간주하여 수역과 함께 활성하도에 포함되는 것으로 판단하였으며, 김지성 등(2015)과 마찬가지로 나대지, 황무지 등은 하중도나 홍수터로 분류하여 하폭에서 제외하였다. 하폭에 미치는 하중도의 영향을 분석하기 위해 하중도를 포함한 하폭과 포함하지 않은 하폭으로 구분하였는데, 이는 영구적 식생으로 덮인 안정된 하중도의 폭은 하폭에서 제외한 Williams(1978)의 견해를 참고한 것이다.

하폭수심비. 측량 자료와 항공사진, 위성영상을 이용하여 1984/85, 2001, 2010, 2016년에 대해 하폭수심비를 계산하였다(Table 2-5). 측량 단면에서의 하폭수심비는 Figure 2-13과 같이 양쪽 강터의 기준점을 정한 후에 두 점 사이의 하폭을 구한 후 모든 하상 측량점에서의 평균수심을 측정하여 계산하였다. 다만, 하중도가 있는 단면의 경우 하중도 부분을 하폭에서 제외하였다. 소구간의 하폭수심비값은 가용한 측량 단면을 모두 사용하여 소구간별로 6~7개의 평균, 최대, 최소값을 구하여 나타냈다.

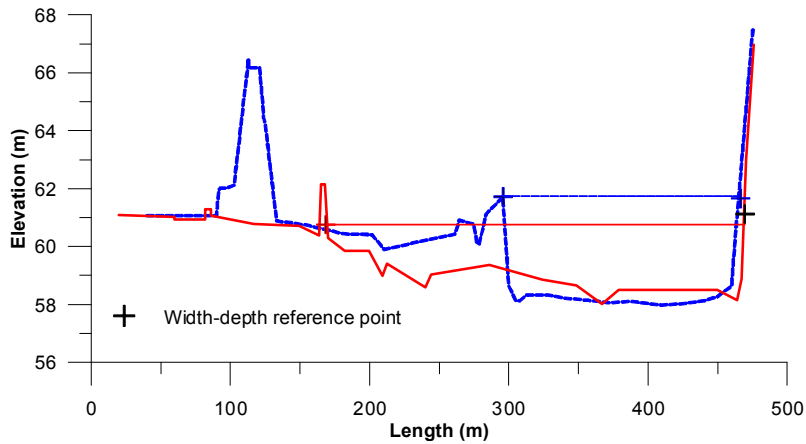


Figure 2-13 Cross-sections of the different year and their corresponding reference points to compute width-depth ratio.

아울러 측량 자료가 없는 1965년에 대해 4개 년도의 단면과 같은 위치에서 위성영상과 1984/85년 단면을 고려하여 하폭수심비의 추정값 범위를 함께 제시하였다. 이는 1965년의 하상이 1950~60년대의 홍수 등에 의한 하폭 확대 등을 반영하고 있을 뿐만 아니라 본격적인 제방 축조, 개수, 골재 채취 등이 이루어지기 전이기 때문이다. 1965년 하폭수심비는 다음과 같은 기준으로 추정하였다. 첫째, 1984/85년의 단면의 홍수터 고도를 강턱고도로 간주하였다. 둘째, 1984/85년 제방선이 1965년의 하천 경계선과 거의 일치하므로 그곳을 강턱으로 간주하였다. 셋째, 1965년의 하상고는 1984/85년과 근사하다고 간주하였다. 참고로 하류 약 20 km 구간을 비교해 볼 때, 1978년의 실측 최심하상고(건설부, 1978)는 1984년과 거의 차이가 없었다. 한편, 2016년 단면은 항공 LiDAR 측량 DEM에서 얻어진 것으로 적색 LiDAR의 특성상 수면 이하의 하상이 반영되지 못하여 하폭수심비가 실제에 비해 약간 높게 산정되었다. 다만, 모래하천의 수심이 비교적 얇고 측량이 저수기인 12월에 시행되었음을 고려하면 하폭수심비의 감소폭은 5~10 정도일 것으로 추정된다.

Table 2-5 Survey data used for width-depth ratio estimation.

Year	Image year	Data
1965	1965	Inferred from width and 1984/85 cross-section
1984/85	1980/1986	River cross-section (Basic river plan)
2001	1996/2005	"
2010	2010	"
2016	2016	LiDAR cross-section

하상고 변화. 2016년을 제외하고 하천기본계획의 연도별 측량 자료로부터 대응하는 시점 사이의 하상고 변화를 계산하였다. 하상고 변화는 통상적으로 분석에 활용되는 것으로서 저수 주하도의 하방침식을 반영하는 최심하상고(lowest bed)를 사용하였고, 이와 함께 하천 공간 내에서 골재 채취 등의 인위적 교란 영향을 함께 반영할 수 있도록 제외지 범위 내에서 하상에서 가장 높은 지점인 최고하상고(highest bed)를 구한 후 그 변화를 함께 비교하였다. 시간별로는 하구(0 km)로부터 27 km 지점까지는 세 시점(1984, 2001, 2010)의 측량 자료가 있는 관계로 1984년과 2001년 사이, 1984년과 2010년 사이의 변화가 계산되었고, 27 km 지점부터 서천 합류점(52 km)까지는 두 시점(1985, 2010년)의 자료만 가용한 관계로 1985년과 2010년 사이의 변화만이 계산되었다.

자료 분석. 하도의 형태적 특성에 관한 계량적 분석 외에 하천기본계획(건설부, 1984; 경상북도, 1985; 건설교통부부산지방국토관리청, 2001; 국토해양부부산지방국토관리청, 2013) 및 기존에 조사된 자료(한국건설기술연구원, 2014)를 이용한 분석을 실시하였다. 여기에는 하상 재료의 대표입경, 수위, 유량 등에 관한 자료 등이 포함된다.

2.2.3 지표피복의 분류와 지도화

지표피복 분류는 항공사진을 직접 판독한 후 수작업으로 분류하였다. Toda et al.(2012)의 경우 최우도법을 이용하여 항공사진을 자동으로 분류하는 방법을 제안한 바 있다. 하지만, 그의 방법은 흑백 영상이 대부분인 국내의 항공사진에서 적용하기가 어렵다는 단점이 있다. 수작업 분류는 자동 분류에 비해 속도는 늦지만 오류로 인한 추가적 확인 작업이 불필요하고, 인위적인 영향에 대한 판단이 용이하였다.

흑백 항공사진에서 식생 판독의 정확성을 높이기 위해 식생 전문가와 항공사진 판독 전문가의 협조를 얻었다. 또한 과거의 특정 시점에만 있었던 이태리 포플러 식재지와 같은 지표 피복을 확인하기 위해 임업통계연보 등의 자료를 참고하였다. 최근에 촬영된 컬러 항공사진의 경우 고해상도이므로 판독이 비교적 용이하였으며, 2010년대 이후 자료의 경우 현장에서 토지 피복을 확인할 수 있었다.

지표 피복은 총 9가지 유형으로 구분하였다(Table 2-6). 5가지는 자연적인 토지피복이며, 4가지는 인위적인 교란 또는 이용이 이루어진 토지 피복이다. 자연적인 토지피복 중 수면은 항공사진 촬영 시점에 물로 덮여 있는 모든 영역을 의미한다. 거의 대부분은 실제 물이 흐르는 수역이며, 일부 사주 내부의 고인 물도 포함된다. 나지 사주는 모래 또는 자갈로 덮인 영역으로서 식생이 전혀 없는 하상이다. 수면과 나지 사주는 촬영 시점의 수위에 따라 달리 나타날 수 있지만, 본 연구에서 그러한 변동성은 고려하지 않았다. 초기 식생은 피복이 점처럼 산개한 형태로 나타나는 초본 식생으로 나지 사주와 거의 동일하지만 약간의 초본이 있는 곳이다. 그에 비해 초본 식생은 밀집되고 면상으로 피복되어 확실히 활착된 초지를 말한다. 목본 식생은 수관을 가진 식생으로 주로 버드나무

류이며, 기타 목본이 포함된다. 인위적인 토지피복 중에 경작지는 논, 밭과 같이 지속적 경작이 이루어지는 곳이다. 플랜테이션은 하천공간 내의 사질토 하상에 조성된 포플러 식재지를 의미하는데, 내성천에는 70년대부터 90년대 사이에만 존재하였고, 통수능 저하의 요인으로 지적되어(국립산림과학원, 2010) 90년대 이후로는 거의 사라졌다(구영본 등, 2010). 벌초지(pasture)의 경우 2000년대 이후로 초본식생을 주기적으로 베어 사료 등으로 활용하는 곳을 말한다. 인위적 하상은 공사 및 골재 채취 등의 과정에서 교란된 사주 구역을 의미하고, 인위적 수면은 역시 공사 및 골재 채취, 일시적 유수 변경 등으로 인해 교란된 수역을 뜻한다.

Table 2-6 Types of riparian landscape unit. HUP represents both ¹Plantation which means Italian Poplar tree cultivation before 2000 and ²Pasture which means areas used for repetitive herb raising/cutting after 2000 identified from field investigation.

	Type					
	Natural	Open water (OWN)	Bare bar (BAN)	Initial herb (BAV)	Herbaceous (VGH)	Tree (VGT)
Man-induced	Cropland (HUC)	Plantation ¹ Pasture ² (HUP)	Disturbed area (BAC)	Disturbed open water (OWE)		

모든 지표피복 분류 작업은 2장의 좌표체계에 따라 통일된 항공사진을 바탕으로 ArcGIS를 이용하여 수행하였고 결과는 .shp 파일 형식으로 저장되었다. 지표피복 분류는 하천의 외곽 경계까지만 시행되었다. 제방, 제방에 준하는 도로, 하천에 연결한 산지와 강터(bank) 등이 하천 경계로 사용되었다. 따라서 연도에 따라서 하천의 외곽 경계는 다소 차이가 있을 수 있다.

2.2.4 다중회귀분석

내성천의 장기적 지표피복의 변화 요인을 정량적으로 규명하기 위해 본 연구에서는 다중회귀분석 기법을 이용하였다. 분석 대상 기간은 1970년부터 2016년까지이며, 이는 독립변수로 활용된 기온, 강수량, 유량 등의 수문기상 자료의 보유 기간에 맞춘 것이다.

다중회귀분석은 두 가지 방식으로 구분하여 수행하였다. 하나는 유역 면적과 유량이 다른 소구간 R01~R13에서 각각 얻어진 자료를 모두 사용하는 소구간별 분석이며, 다른 하나는 연구 구간 전체를 하나로 보아 분석하는 전구간 분석이다.

2.2.4.1 종속변수

다중회귀분석의 종속변수는 항공사진을 토대로 분류된 지표피복도에서 비교 대상 전후 연도의 면적변화를 나타낸다. 지표피복을 비교한 연도의 쌍은 Table 2-7와 같이 총 12개이다. 1996년부터 2005년까지의 기간은 분석하지 못하였는데, 이는 2000년 위성영상의 해상도가 낮아 지표피복을 판독할 수가 없었기 때문이다. 이에 따라 1996~2000년 기간과 2000~2005년 사이 기간의 변화는 분석 대상에서 제외되었다.

Table 2-7 Pairs of years used for analysis on change of land surface cover.

	Year											
Prior	1970	1974	1979	1980	1986	1988	1991	1995	2005	2008	2010	2013
Posterior	1974	1979	1980	1986	1988	1991	1995	1996	2008	2010	2013	2016

본 연구에서는 지표피복의 변화를 상반되는 두 가지 방향으로만 한정하여 분석하였다. 그 하나는 자연적인 원인에 의해 식생역이 확장된 것으로 수역과 나지사주 및 초기식생이 초본 및 목본 식생역으로 바뀐 것이다. 이를 나타내는 변수는 ENCR (encroachment)이라고 명명하였다. 다른 하나는 ENCR과는 반대 방향의 작용으로 식생역이 없어지고 수역과 나지사주 및 초기식생으로 바뀐 것이다. 이는 유수의 직접적인 침식에 의한 식생역의 제거와 홍수시 식생역을 통과하는 침수로(chute) 흐름이 운반한 소류사(bedload)의 퇴적으로 인한 식생이 매몰되어 다시 나지사주로 바뀌는 것을 포함한다. 이를 나타내는 변수는 RECV(recovery)으로 명명하였다. 이와 함께 경작지나 플랜테이션/목초지와 같은 인위적인 지표피복이 유수의 동일한 작용에 의해 수역과 나지사주로 바뀌는 경우도 포함하였다. 왜냐하면 대부분의 경작지나 목초지는 선행하는 식생역을 인위적으로 활용한 것이며 이들 인위적 지표피복은 상대적으로 홍수의 침수 빈도가 낮은 지역에 위치하여 이미 활성화도의 바깥에 있는 영역으로 취급되기 때문이다. 이렇게 얻어진 두 개의 변수의 차는 지표피복의 면적변화를 의미하는 변수인 AC(area change)를 계산하는데 이용된다(Table 2-8). 양의 AC는 식생역의 확대를 의미하고 음의 AC는 식생역의 축소를 의미한다. 모든 변수는 면적을 의미하며 단위는 제곱미터(m^2)이다.

Table 2-8 Definition of dependent variables.

Variable	Land cover prior	Land cover posterior
ENCR	OWN, BAN, BAV	VGH, VGT
RECV	VGH, VGT, HUC, HUP	OWN, BAN, BAV
AC	ENCR-RECV	

본 연구에서는 다음의 이유로 AC만을 종속변수로 사용하였다. 첫째, ENCR과 RECV를 위한 면적을 측정할 때, 항공사진을 촬영한 시점과 관련하여 영상 속에서 수관의 계절적인 크기 변화 등에 기인한 식생 면적의 측정오차가 포함될 수 있다. 둘째, ENCR과 RECV는 Table 2.1에 나타난 정사보정된 항공사진의 위치 오차로 인한 면적 오차를 반영하기 때문이다. 이러한 오차는 측척에 의한 것이 아닌 수평이동에 의한 것이므로 두 변수 모두에 반영된다. 따라서 불필요한 값의 증가가 발생할 수 있다. 이에 비해 AC의 경우 위치 오차가 상쇄되어 실제의 면적 변화를 반영하는데 유리하다고 판단하였다.

지표피복 면적변화를 정확하게 측정하기 위해 추가적으로 두 가지 작업을 시행하였다. 먼저 비교하는 전후 연도의 총면적을 일치시키기 위해 ArcGIS의 교집합(intersect) 기능을 이용하여 안쪽 교집합 부분에 속하는 하천공간 면적만을 추출하여 사용하였다. 이는 제방의 축조로 인해 하천 공간 외부로 분리된 곳을 비교할 수 없기 때문이다. 그 다음으로는 하상 정비 및 식생역 제거, 골재 채취, 큰 규모의 제방공사와 같은 인위적 교란이 뚜렷이 확인된 소구간의 경우 분석에서 제외하였다. 다만, 개별 소구간의 인위적 교란 면적이 차지하는 비율은 13개 소구간 전체의 면적에 비하면 적으므로 전구간 분석의 경우 인위적 교란 면적을 별도로 고려하거나 제외시키지 않았다.

2.2.4.2 독립변수

독립변수는 종속변수인 AC의 변화에 영향을 미칠 것으로 추정되는 원인 변수들로서 수문, 지형, 기상 등 세 가지 유형으로 구분된다. 변수들은 1970~2016년의 기간을 포괄할 수 있는 것만을 사용하였으며, 비교하는 연도 쌍에 대응하는 기간에 대해 평균값을 취하여 사용하였다. 예를 들어 1970년과 1974년 항공사진에서 측정된 지표피복 면적변화는 1970~1974년 기간의 독립변수의 평균값에 대응한다. 각 독립변수는 산술값을 그대로 이용하거나 자료의 비선형 특성을 고려하여 대수변환하여(log-transformed) 통계분석에 이용하였다.

유량. 유량은 수문변수로서 하폭이나 수심, 사행과장의 크기처럼 하도의 지형학적 규모를 결정짓는 일차적인 인자이다. 또한 기존의 많은 연구에서 유량의 감소는 식생역 증가의 주된 요인으로 여겨져 왔다. 하지만 Johnson(1994)의 연구를 제외하면 연중 어떤 시기의 유량이 영향을 미치는지에 관해서 직접적인 분석은 거의 수행되지 않았다. 본 연구에서는 식생역의 증감에 영향을 미칠 것으로 추정되는 유량을 월별, 기간별로 세분화하여 독립변수로 사용하였다. 이 때 항공사진 비교 연도 쌍에 대응하는 기간의 평균적인 특성과 어느 한 해 유량 변동성을 모두 고려하기 위해 기간 평균값, 최저년도의 값, 최고년도의 값을 모두 구별하였다(Table 2-9). 그리고 모든 유량은 일유량 시계열 자료로부터 계산하였다(Figure 2-8).

Table 2-9 Variables used for sub-reach analysis. For whole reach analysis, Q is replaced by Qt which represents discharge of Wolpo Station. For log-transformed variables, 'L' is attached prior to Q.

Type	Period	Yearly mean	Lowest year	Highest year
Peak discharge (unit : m ³ /s)	June	Q _{JNK}	Q _{JNKL}	Q _{JNKH}
	July	Q _{JYK}	Q _{JYKL}	Q _{JYKH}
	August	Q _{AUK}	Q _{AUKL}	Q _{AUKH}
	June~July	Q _{JJK}	Q _{JJKL}	Q _{JJKH}
	June~August	Q _{JAK}	Q _{JAKL}	Q _{JAKH}
	June~September	Q _{JSK}	Q _{JSKL}	Q _{JSKH}
	August~September	Q _{ASK}	Q _{ASKL}	Q _{ASKH}
	May~December	Q _{MDK}	Q _{MDKL}	Q _{MDKH}

내성천 전체 구간에서 분석 대상 기간에 대해 가용한 유량값은 월포 지점에서만 얻을 수 있다. 이 값은 전구간 분석에서 독립변수로 사용하였다. 소구간별 유량은 월포 지점의 유량을 각 소구간의 유역면적비로 계산하여 사용하였다(Table 2-10). 이 방법의 타당성을 확인하기 위해 유량 실측과 국토교통부의 수위-유량 관계를 기반으로 공식적인 유량이 제공되는 지점인 조제(R12), 향석(R02)에서 2010~2016년 기간의 실제 유량과 면적비로 계산한 유량을 비교하였다. 그 결과 홍수 사상에 따른 편차는 있으나 평균적으로는 면적비 유량과 거의 일치하는 것으로 나타났다(Table 2-11).

Table 2-10 Drainage area of individual sub-reaches.

Sub-reach	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	R09	R10	R11	R12	R13	Wolpo
Drainage area (km ²)	1,514.2	1,505.4	1,490.1	1,451	1,313.9	1,160.7	1,149	1,124.4	1,104.1	1,019.3	914.6	901.5	879.4	1,158.5
Area ratio	1.307	1.299	1.286	1.252	1.134	1.002	0.992	0.971	0.953	0.88	0.789	0.778	0.759	1.000

Table 2-11 Comparison of observed and estimated discharge based on the watershed area ratio for two gauging stations along the Naeseong Stream. Observed data are from Nakdong River Flood Control Office of Korea.

Type	Peak date	Wolpo (1,158km ²)		Joje (914.6km ²)		Hyangseok (1,514.3km ²)	
		Discharge (m ³ /s)	Discharge ratio	Discharge (m ³ /s)	Discharge ratio	Discharge (m ³ /s)	Discharge ratio
Observed discharge	2010-09-12	517.5	1.00	374.4	0.72	546.2	1.06
	2011-06-25	1,162.0	1.00	944.0	0.81	1,581.3	1.36
	2012-07-16	293.5	1.00	246.3	0.84	357.6	1.22
	2013-06-19	410.1	1.00	290.1	0.71	592.2	1.44
	2014-08-21	397.3	1.00	376.4	0.95	404.3	1.02
	2015-07-14	26.6	1.00	18.2	0.68	35.1	1.32
	2016-07-05	598.7	1.00	459.1	0.77	746.4	1.25
	Mean		1.00		0.78		1.24
Area ratio			1.00		0.79		1.31
Matching ratio			1.00		0.99		0.95

하천력. 하천력(stream power) 역시 수문변수로서 유사를 이송하고 지형을 형성하는 하천의 에너지를 나타내며, 물의 밀도(ρ), 중력가속도(g), 유량(Q), 하도경사(S)의 곱이다(Eq. 2-4).

$$\Omega = \rho g Q s \quad (2-4)$$

또한, 단위폭당 하천력(unit stream power)은 하천력(Ω)을 하폭으로 나눈 것으로(Eq. 2-5), 하천 및 홍수터의 성인적 분류에도 사용된다(Nanson & Croke, 1992).

$$\omega = \frac{\Omega}{w} \quad (2-5)$$

본 연구에서는 1984년의 구간별 하도경사를 Table 2-9의 모든 유량 변수와 곱하여 Ω 와 ω 를 산정한 후 독립변수로 사용하였다. 모든 시기별 변수는 유량 변수에 적용한 것과 같다.

지형 변수들. 하폭, 사행도와 같은 하도의 지형학적 변수들은 유수의 지형형성 작용에 영향을 미친다. 본 연구에서는 제방의 축조에 의해 현재의 하천 공간이 거의 정해진 1965년의 제방선 기준의 하폭(이하 1965년 하폭), 각 연도의 강터하폭, 그리고 사행도 등 세 가지 변수를 독립변수로 사용하였다(Table 2-12). 이 세 지형 변수들은 소구간별 분석에만 적용되었으며, 1965년 하폭과 사행도는 연도에 관계없이 공통적으로 적용되었고, 각 연도의 강터하폭은 연도별로 적용되었다.

Table 2-12 Geomorphological independent variables. For log-transformed variables 'L' is attached prior to each name.

Type	Item	Variable
Geomorphological variables (non-dimensional)	Sinuosity	SIN
	Inter-levee width of 1965	W _L
	Bankfull width	W _B

기후 변수들. Vanloocy & Martin(2005)는 기온, 강수량 등의 기후 요인도 식생 면적의 증가 원인 중에 하나라고 보았다. 기온과 강수량은 식물의 생장과 직접적인 연관성이 있다. 또한 강수량은 수문변수인 유량과 상관도가 높다. 본 연구에서는 1973년부터 자료가 있는 영주 기상관측소의 기온과 강수량을 대푯값으로 보고 독립변수로 선정하였다. 그 이유는 영주 지점이 항공사진과 비교할 수 있는 장기간의 자료를 보유하고 있고, 내성천 유역 전체가 소백산맥 남쪽에 위치하고 있고 유역 내에 기후학의 공간적 차이를 야기할만한 큰 지형이 없는 관계로 기후학적인 유사성이 크다고 보았기 때문이다. 다만, 1971~72년의 기온은 1973년과 같다고 보았으며, 이 기간의 영주 강우량은 국토교통부 자료를 이용하였다. 기후 변수는 전구간에 동일하게 적용되므로 강우량은 전구간 분석에 사용하였으며, 기온의 경우 소구간별 분석 및 전구간 분석에 모두 적용되었다. 기온과 강우량은 월이나 기간에 따라 구별된 독립변수를 정의하여 사용하였다(Table 2-13).

Table 2-13 Climatic independent variables.

Type	Period	Variable
Rainfall (unit : mm)	April	R _{AP}
	May	R _{MY}
	June	R _{JN}
	July	R _{JY}
	August	R _{JJ}
	June~July	R _{AU}
	June~August	R _{JA}
	June~September	R _{AS}
	August~September	R _{JS}
	Annual	R _{YR}
Daily temperature (unit:°C)	Mean of January	T _{JA}
	Lowest of January	T _{JL}
	Mean of February	T _{FE}
	Lowest of February	T _{FL}
	Mean of March	T _{MA}
	Mean of April	T _{AP}
	Mean of May	T _{MY}
	Mean of June	T _{JN}
	Lowest of January~February	T _{LW}
	Mean of April~June	T _{AJ}
	Annual mean	T _{YR}

2.2.4.3 통계분석 프로그램

통계분석은 오픈소스 통계 프로그램인 R(Ver. 3.4.0)(R Development Core Team, 2017)을 이용하여 실시하였다. R은 명령줄 기반으로 수행되는 인터프리터 프로그램이며, 공백(.txt), 쉼표(.csv), 탭(.dat) 등으로 분리된 형식을 지원한다. 본 연구에서는 모든 자료는 Microsoft의 Excel을 이용하여 정리한 후 쉼표 분리 파일로 저장하여 R에서 분석하였다. R의

사용자 인터페이스와 명령 콘솔은 Figure 2-14와 같다.

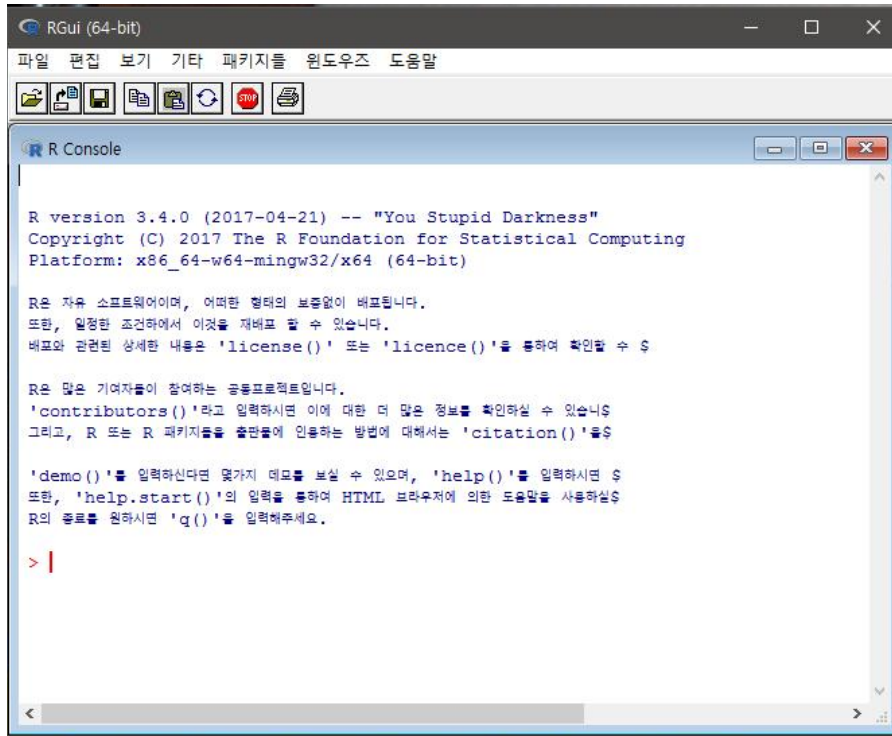


Figure 2-14 GUI and console screen of R.

다중회귀분석시 독립변수는 주로 전방단계선택(forward stepwise) 기법으로 투입하였다. 이 방법은 모든 독립변수 중에서 설명력이 가장 높은 변수 순으로 회귀방정식에 투입하여 진행하는 방법으로 독립변수 중에서 어떤 변수가 모형에 대한 설명력을 가장 잘 예측할 수 있는지를 F 검정치에 대한 유의확률을 통해 결정한다(정충영과 최이규, 1996). 적용에 있어서는 주로 3변수 모형까지만 사용하였다. 이와 함께 전방단계선택 기법의 결과를 검토한 후 필요에 따라 시행착오법으로 독립변수를 구성하여 회귀분석을 실시하였다.

다중회귀분석시 유사한 성격의 독립변수들이 투입되어 발생할 수 있는 다중공선성(multicollinearity) 문제를 검토하기 위해 독립변수간 상관계수와 분산팽창계수(variance inflation factor)를 계산하였다. 상관계수는 0.7 미만인 경우에 두 변수를 모두 채택하였고, 분산팽창계수는 10 미만인 경우에 공선성이 없다고 판단하였다. 분산팽창계수의 계산에는 R의 Car 라이브러리를 이용하였다.

입력한 자료의 세트는 전구간 분석에 대해서는 12개이고, 소구간별 분석에 대해서는 146개이다. 이는 전체 156개(13개 소구간 × 12개 연도쌍) 중에서 항공사진 판독 결과 식생 제거, 골재 채취, 하상정비, 제방 공사 등 인위적 교란이 뚜렷하게 반영되어 분석에 영향을 끼칠 것으로 판단되는 자료 10개를 제거한 결과이다.

3. 20세기 이후 내성천 하도의 지형학적 변화

3.1 결과 및 분석

3.1.1 평면적인 하도 형태 변화

내성천의 하곡사행도와 1954~2013년 평균 저수 주하도 사행도는 Table 3-1과 같다. 하곡사행도를 보면 연속적인 만곡부가 포함된 R02, R06, R13에서는 하곡사행도가 1.5를 초과하며, 직선 하곡구간인 R03~R05, R09~R10에서는 1.2 이하로 낮게 나타난다. 이러한 특성은 내성천이 산지사행하천으로서 만곡이 발달한 곳과 그렇지 않은 곳 사이의 차이가 크기 때문이다. 반면에 하곡 내부에서 저수시 주하도 사행도는 1.01~1.12 사이로 전반적인 수치는 낮게 나타났다.

Table 3-1 Sub-reach sinuosity. SI_{MC} is mean of 1965~2016.

Reach	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	R09	R10	R11	R12	R13
SI_V	1.31	2.53	1.01	1.03	1.10	1.75	1.23	1.35	1.09	1.19	1.29	1.49	1.88
SI_{MC}	1.03	1.11	1.02	1.01	1.02	1.08	1.08	1.12	1.07	1.05	1.09	1.03	1.12

Figure 3-1은 연도별 저수 주하도의 사행도 변화를 나타낸다. 짙은 네모는 13개 소구간 평균값, 위/아래의 수평막대는 최대/최소값이다. Table 3-1에서 보여지는 소구간별 변동폭이 크에도 불구하고 연도별 사행도는 1954~1995년에는 거의 동일한 값을 유지하였으나 2013년에는 평균, 최대, 최소값이 모두 감소한 경향을 나타낸다. 이는 2013년의 저수 주하도

가 과거에 비해 하곡 내에서 중심선에 가깝게 형성되어 있고 좌우 이동이 상대적으로 더 적음을 의미한다. Fig 3-2는 하류 R03~R04에서 그 사례를 보여주고 있는데, 2013년의 경우 1954년 및 1988년에 비해 저수주하도의 측방 이동성이 감소하였다.

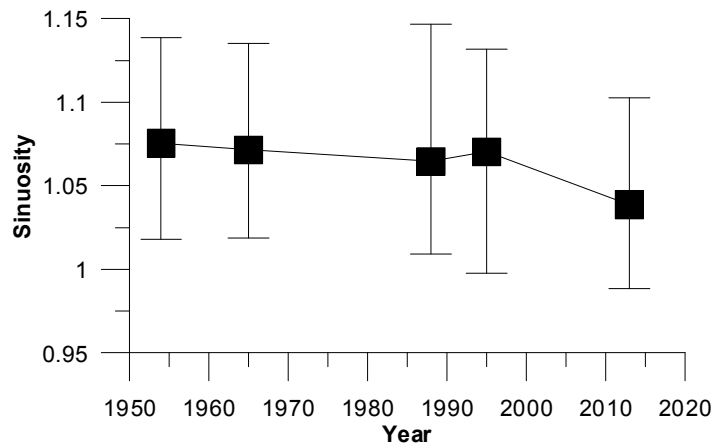


Figure 3-1 Temporal change in low water channel sinuosity

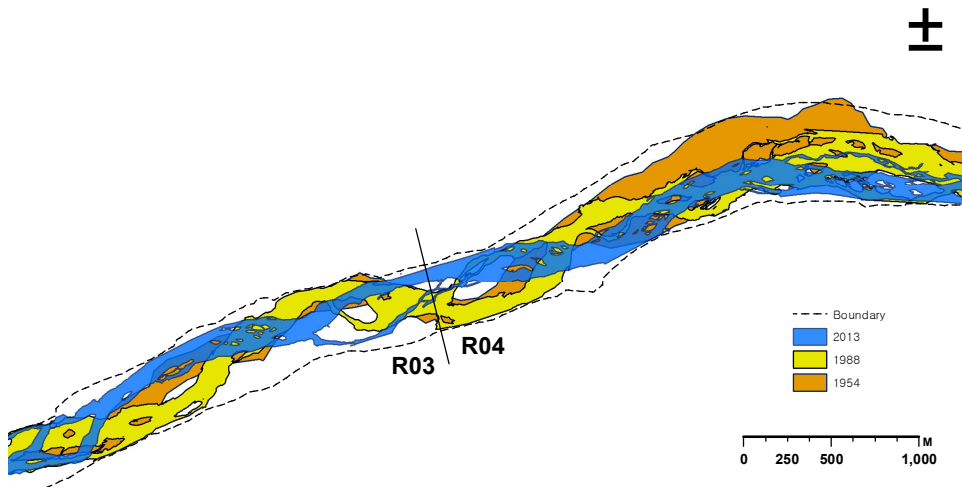
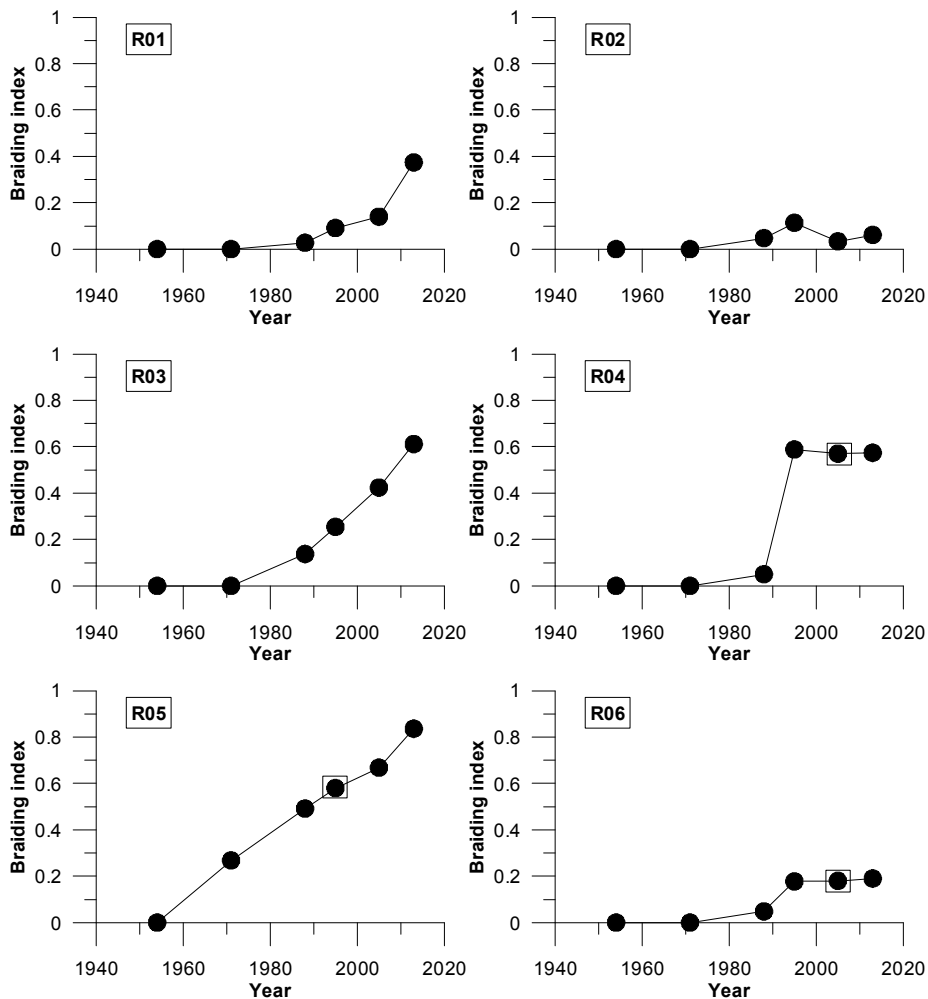


Figure 3-2 Change of low water channels during 1954~2013

Figure 3-3은 소구간별 망류지수의 연도별 변화를 나타낸다. 빈 네모가 추가된 점은 인위적인 제거가 없었을 경우에 추정되는 수치를 의미한다. 또한 상류의 R09, R11~R13에서 망류지수는 연도에 관계없이 0을 나타내고 있어서 제외하였다. 전반적으로 볼 때, 내성천의 망류지수는 소구간에 관계없이 1.0 미만으로 나타났다. 이는 식생사주와 하중도 길이의 합이 소구간 길이보다 짧다는 것을 의미하는 것으로서 그것들이 하폭 방향으로 다수의 열을 이루는 유형의 망류는 아니라고 할 수 있다.



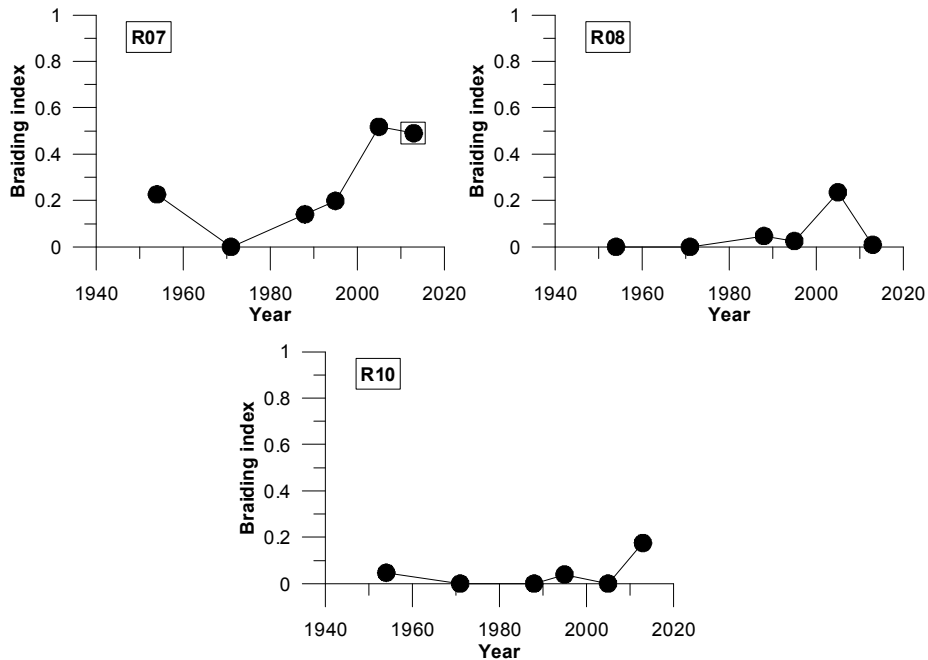


Figure 3-3 Change in braiding index (1954~2013). Boxes added to the filled circles indicate estimated values under assumption of no human disturbance

망류지수의 특성을 소구간별로 살펴보면, R01, R06과 R10은 장기간 0의 상태가 지속되다가 1990년대 이후 증가하기 시작하였지만 그 값은 0.2~0.3 정도이며, 이는 식생사주의 형성과 하중도 발달이 제한적임을 의미한다. R02와 R08에서는 망류지수가 일시적으로 증가하였다가 다시 감소하여 식생사주 형성이 미약함을 알 수 있다. 이에 비해 R03과 R05는 1970년대 이래로 망류지수가 계속 증가하면서 상대적으로 높은 수치를 나타내고 있어서 식생사주와 하중도의 형성과 발달이 지속적으로 이루어져 왔음을 알 수 있다. 한편, R04와 R07은 R03, R05와는 달리 망류지수가 0.5 이상까지 증가했다가 최근에는 정체되거나 감소하였다. 이러한 현상은 일부는 인위적인 제거의 영향에 의한 것이고, 또 일부는 하중도가 홍수터에 부착되었기 때문이다. 주하도에서 이격되어 있거나 나지

사주로 둘러싸여 있는 식생사주의 경우 주변 지역이 식생 활착에 의해 홍수터로 변모하는 과정에서 기존의 홍수터에 부착된다. 같은 의미에서 R03과 R05의 몇몇 하중도는 현재 폭이 좁은 배후 유로로 분리되어 있으나 홍수터에 매우 근접해 있어 배후 유로에 퇴적과 식생 활착이 진행되고 하중도가 홍수터에 부착되면 망류지수가 정체 내지는 감소될 것이다.

3.1.2 활성화도 하폭과 하폭수심비

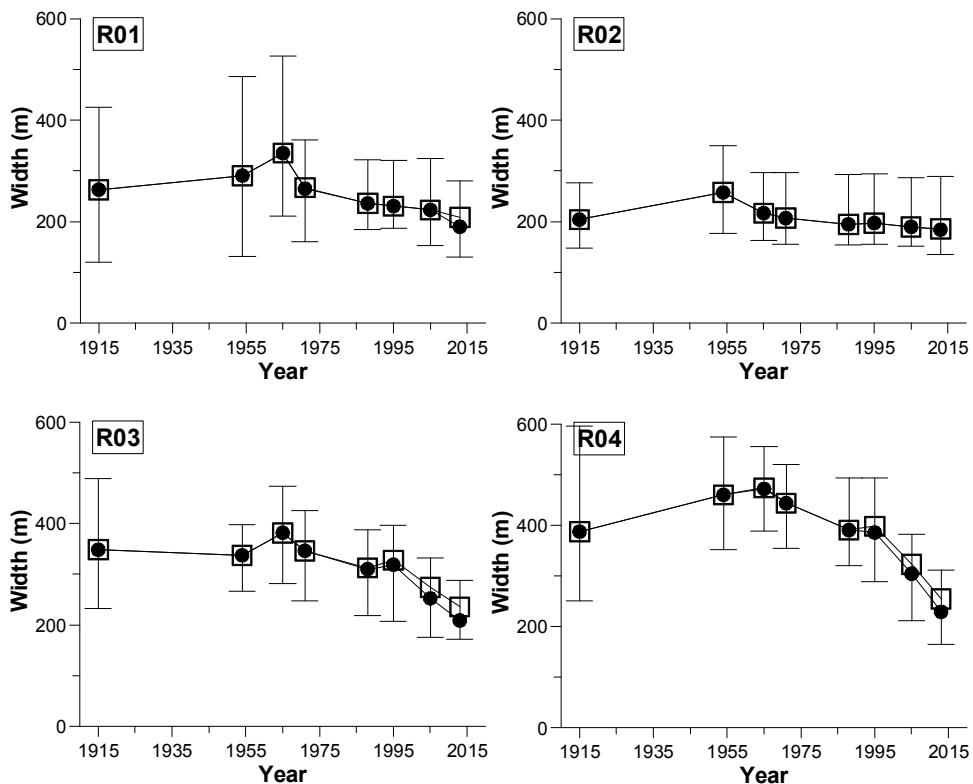
Figure 3-4는 1915년부터 2013년까지 소구간별로 20개의 횡단선의 평균값으로 측정한 내성천 소구간별 활성화도의 하폭 변화를 보여준다. 빈네모는 하중도를 포함한 하폭이며, 짙은 네모는 하중도를 제외한 하폭이다. 위와 아래의 수평막대는 횡단선 최대, 최소 하폭이다.

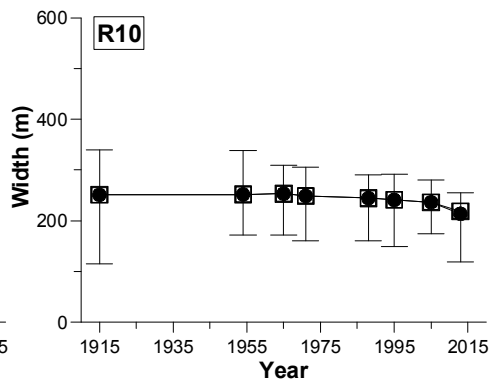
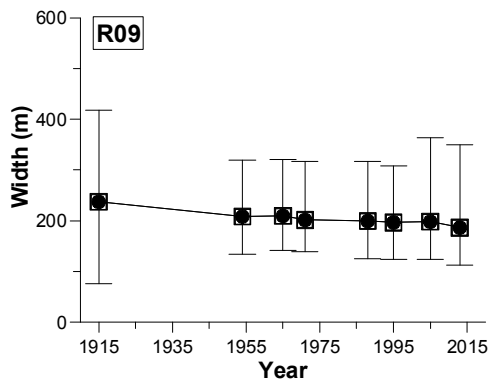
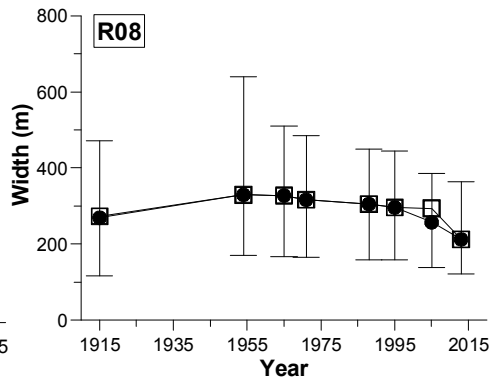
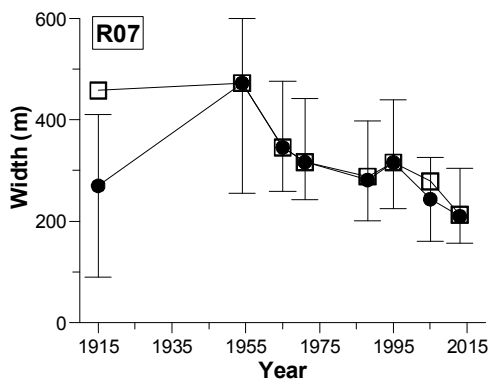
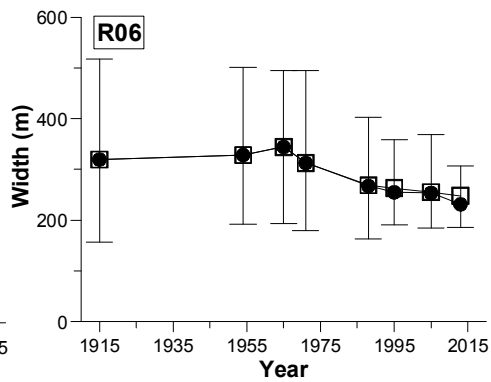
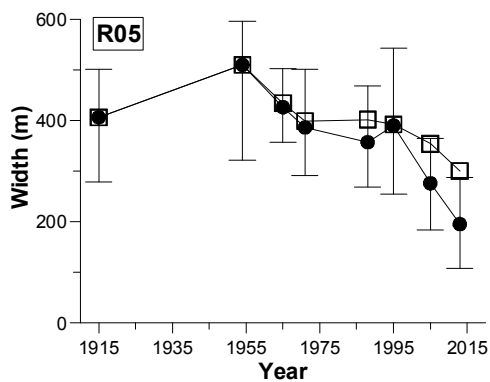
시기별로 하폭의 변화 경향을 보면 1915년부터 1954년 또는 1965년까지의 기간에는 약간의 증가가 나타난다. R10~R12 소구간을 제외하면 1965년 이전의 하폭은 지형도에 의해 측정된 것으로 항공사진 판독에 의한 하폭과는 측정 자체의 차이가 있을 수 있다. R07의 경우 우안 고평리 부근의 큰 하중도의 영향이 반영되어 있다. 1965년 이후에는 1988~1995년 기간의 정체 내지는 약간의 증가를 제외하면 하폭은 2013년에 이르기까지 지속적으로 감소하였다. 그리고 가장 급격한 감소가 이루어졌던 기간은 1995년 이후이다. 이와 함께 대부분의 소구간에서 하폭의 최대-최소 범위 역시 시간이 갈수록 감소하여 위치에 따른 하폭의 변동성이 줄어드는 특성을 나타내고 있다.

1965년 이후의 변화를 소구간별로 보면 R01, R03~R08 등 하류 구간에서는 1965년 이후 하폭이 크게 감소하였다. 하폭의 감소 비율은 33~55%에 달한다(Table 3-2). R05의 경우 폭이 100 m 달하는 큰 하중도로

인해 하폭 감소가 더욱 두드러졌다. 그 외의 R01, R03~R04, R06~R08에서는 하중도 폭이 10~20 m 정도로 하중도에 의한 영향보다는 좌우안에 연해 있는 홍수터의 확장으로 인한 하폭 감소가 더 두드러졌다. 다만 이것이 직접적으로 하중도의 발달이 적다는 의미라고 볼 수는 없는데, 이는 이미 형성된 하중도는 배후의 분기유로에 퇴적이 진행되면 연결된 홍수터의 일부가 되기 때문이다.

R02와 상류 구간인 R09~R13에서는 상대적으로 하폭의 감소가 적었다. 감소 비율은 6~16% 정도로 하류 구간에 비해 현저히 적다(Table 3-2). 또한 하중도의 형성으로 인한 하폭의 감소 영향도 거의 없는 것으로 나타났다.





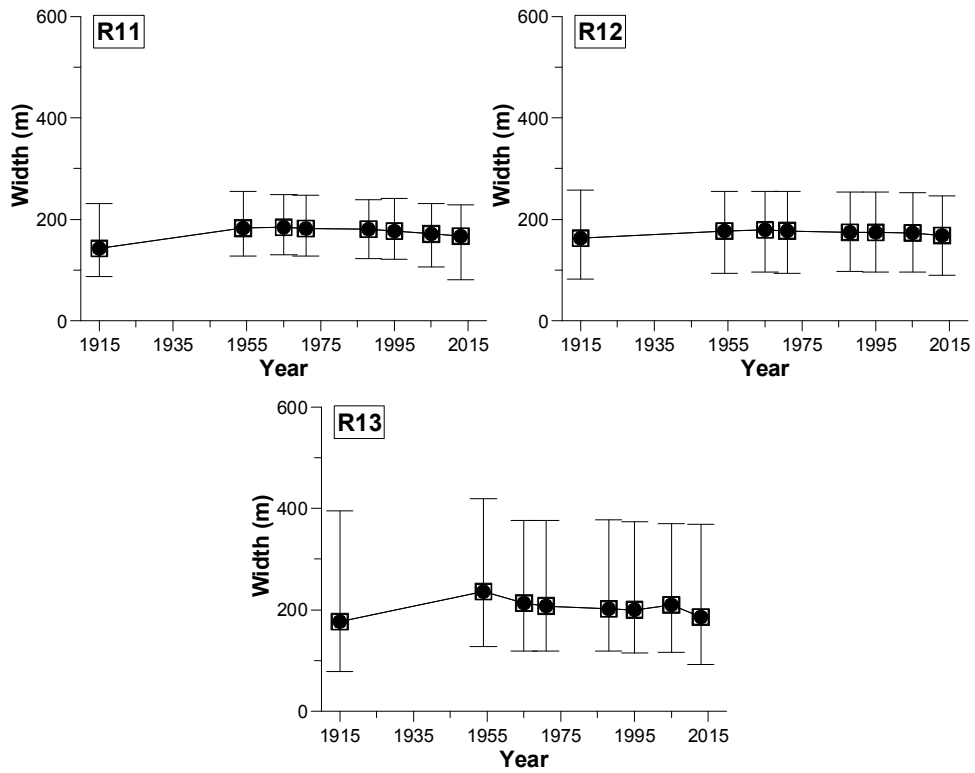


Figure 3-3 Changes in mean active channel widths of 20 crossings for all sub-reaches during 1915~2013. High and low bars indicate maximum and minimum values, respectively. Hollow boxes and filled circles represent widths with- and without islands, respectively.

Table 3-2 Island-excluded width in 1965 and 2013 and reduction ratio

Sub-reach	Width (m)		Reduction (%)	Sub-reach	Width (m)		Reduction (%)
	1965	2013			1965	2013	
R01	335.2	189.8	43.4	R09	209.4	186.3	11.1
R02	216.7	184.1	15.0	R10	253.2	213.5	15.7
R03	381.8	208.8	45.3	R11	184.2	166.7	9.5
R04	473.8	228.8	51.7	R12	179.1	168.2	6.1
R05	434.3	194.9	55.1	R13	213.1	185.8	12.8
R06	344.2	231.0	32.9				
R07	345.4	209.5	39.3				
R08	327.4	212.0	35.3				

Figure 3-5는 하폭 감소가 두드러진 R03~R05, R07 소구간에 대해 단면 측량 자료를 이용하여 구한 하폭수심비의 연도별 변화를 보여준다. 2장에서 언급한 것처럼 1965년의 하폭수심비는 추정치이며, 200~450 사이이다. 또한 1965년 이래로 하폭수심비는 지속적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 1984년의 하폭수심비는 평균 200을 넘고 특히 R04에서는 400에 달하여 이 구간에서 하폭이 수심에 비해 크게 넓었음을 알 수 있다. 하폭수심비는 1984년과 2001년 사이에 가장 급격한 감소를 나타내며, 100~180 수준이 되었는데 이는 앞에서 언급한 1995년 이후의 하폭의 급격한 감소와 다음 절에서 다룰 하상의 저하에 기인한 것으로 보인다. 지점에 따라 차이가 있으나 2000년대 이후에는 하폭수심비가 정체되거나 약간 반등하였다. R03, R04는 2010년에서 2016년 기간에, R05는 2001년과 2010년 사이에 반등이 일어난 것이다. 이 기간에 하폭이 증가하지 않았으므로(Fig 3-4), 그 이유 중에 하나로 추정할 수 있는 것은 인위적인 교란에 의한 하중도의 제거이다.

하폭수심비의 변화를 통해 알 수 있는 것은 내성천의 하폭수심비는 지형학적 하도 분류(Rosgen, 1994; Buffington & Montgomery, 2013)에서 망류하천으로 분류되는 값인 40~150을 상회하며, 그 형상은 폭이 매우 넓은 망류하천을 나타낸다. 그리고 과거에는 하폭이 지금보다 더 넓었으며 하폭수심비는 200 이상으로 식생사주와 하중도가 없이 하중사주만 발달하는 망류하천이었지만, 현재는 하폭이 감소하였고, 그에 따라 하폭수심비 역시 100 정도까지 감소하였다. 이는 수변 식생의 활착과 세립질 퇴적으로 인해 하중도와 강턱이 발달하였고, 하도 주변부가 홍수터로 변화된데 기인하며, 이로 인해 내성천은 하중도형 망류하천으로 변화한 것이다.

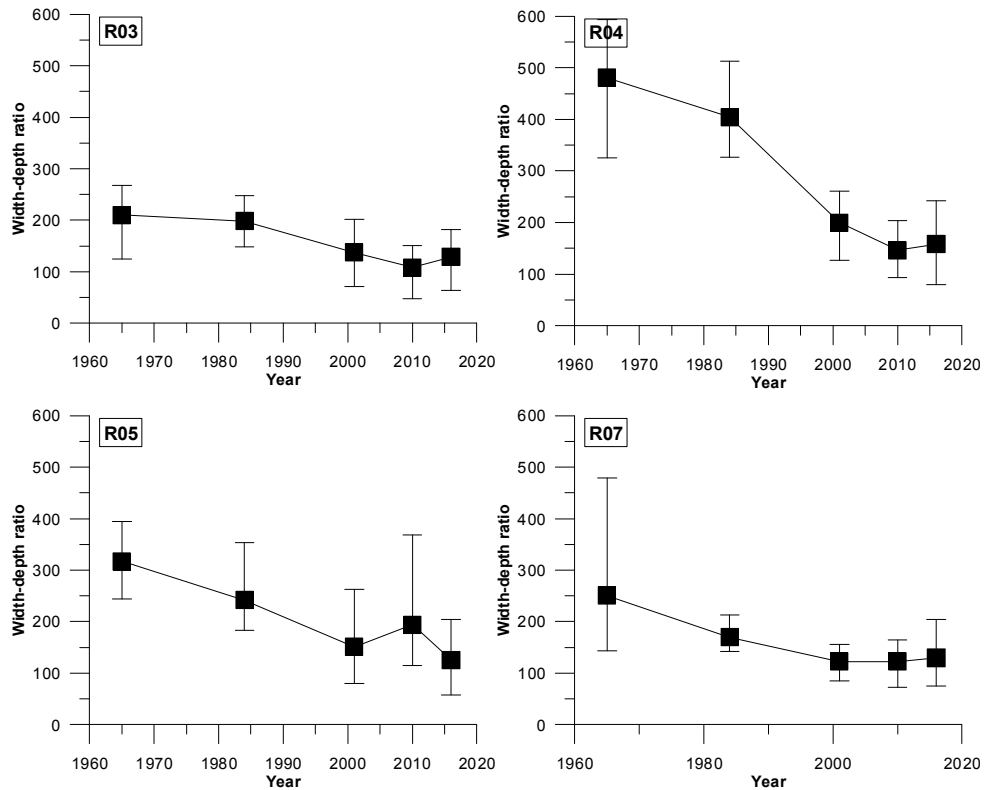


Figure 3-5 Change in width-depth ratio for downstream sub-reaches (R03~R05, R07). Values in 1965 were estimated.

3.1.3 하상고 변화

Figure 3-6는 하류 소구간(R01~R07)에서 1984과 2001년 사이의 하상고 변화를 최심(lowest bed) 및 최고(highest bed) 지점을 중심으로 보여준다. 소구간에 따라 차이가 있으나 최심하상고는 모든 소구간에서 낮아졌고, 그 평균은 0.74 m, 저하율은 0.043 m/yr이다. 소구간별로 보면 R02와 R06, R07에서는 평균 이하로 낮아졌고, R01, R03~R05는 상대적으로 덜 저하되었다. 다만 이동성 하상의 모래하천에서 한 지점의 최심하상고가 하상파(bedform)의 이동, 국부적 세굴, 측량 시점의 유량 등에 따라

변동성이 있으므로 소구간별 차이가 확연하다고 보기에는 무리가 있을 수 있다. 한편, 최고하상고의 경우 R05, R06에서의 일부 저하를 고려하더라도 평균 0.16 m 상승함으로써 최심하상고와는 상반되는 특성을 보였다. 이는 앞서 언급한 모래하천의 변동성을 고려하더라도 1984~2001년의 기간 동안 하도 내에서 지형이 상대적으로 높은 만곡사주, 하중도 등은 여전히 그 고도를 유지하거나 퇴적에 의해 다소 상승하였음을 의미한다.

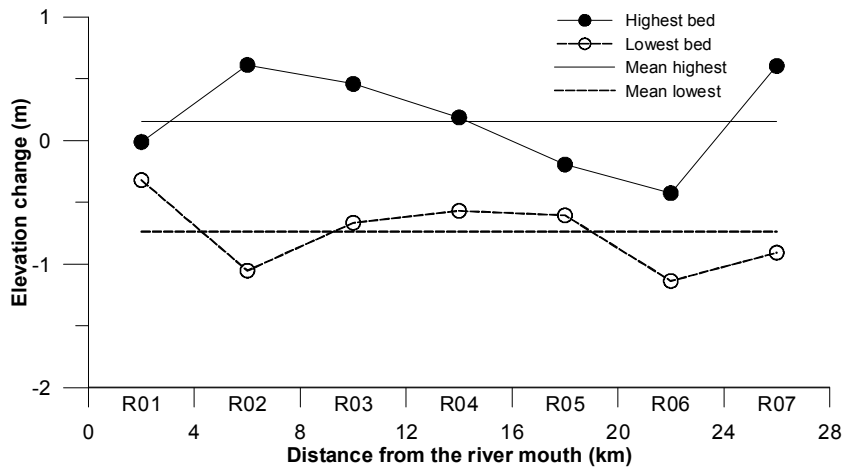


Figure 3-6 Change in riverbed elevation during 1984~2001

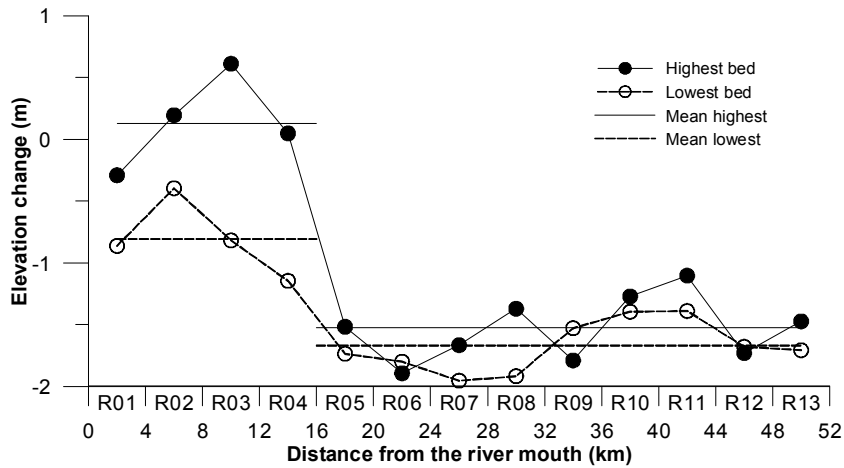


Figure 3-7 Change in riverbed elevation during 1984/85~2010

Figure 3-7은 누적적인 측면으로서 1984년(R01~R07, 국가하천구간)과 1985년(R08~R13, 지방하천구간) 대비 2010년의 하상고 변화를 보여준다. 하상고 변화의 차이가 뚜렷한 R01~R04 구간과 R05~R08 구간을 분리해서 살펴보면 최심하상은 R01~R04에서는 0.81 m (0.031 m/yr) 만이 저하됨으로써 이 구간의 하상은 2001년 이후로 거의 유지되고 있음을 알 수 있다. 이에 비해 R05~R13에서는 1.67 m (0.064 m/yr) 저하됨으로써 훨씬 더 큰 변화가 초래되었다. 최고하상에서도 R01~R04 구간과 R05~R13 사이의 상반된 특성이 나타나고 있다. R01~R04의 경우 평균 0.13 상승함으로써 1984~2001년의 변화가 그대로 유지되고 있는 반면, R05~R13의 경우 하상의 저하 정도는 1.52 m (0.059 m/yr) 로 역시 큰 변화가 나타났음을 알 수 있다.

이러한 공간적 차이는 주로 구간에 따라 차별적인 골재 채취를 포함한 하천 관리 계획과 관련이 있는 것으로 판단된다. 1984년에 수립된 하천 기본계획(건설부, 1984)은 내성천 하류 구간(R01~R07) 골재량(3,537,000 m³)의 약 80%를 채취 가능량으로 제시하였고, 1989~2000년의 실제 채

취량은 약 3,123,000 m³에 달하였다(국토해양부부산지방국토관리청, 2013). 하지만, 2001년의 하천계획에서는 회룡포 상하류를 포함하는 R01~R04 구간에서는 자연 및 경관보존 목적으로 골재 채취가 억제되었고(건설교통부부산지방국토관리청, 2001), 그 외의 구간에서는 지속적인 골재 채취가 이루어졌다(Figure 3-8). 이는 본 연구에서 분석한 하상고 변화와 일치하는 것이다. 같은 이유가 상류 구간 중에서 R09~R11에서 최심 및 최고하상고의 저하가 상대적으로 적게 나타난 원인으로 설명될 수 있다(허준, 2017). 요컨대 2000년대 이후의 차별적인 골재 채취가 하상고 저하의 공간적 차이를 초래한 것으로 판단된다.

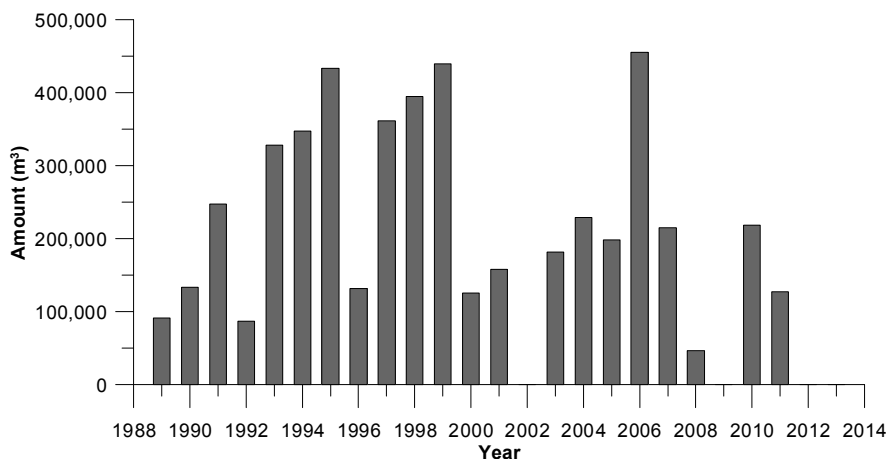
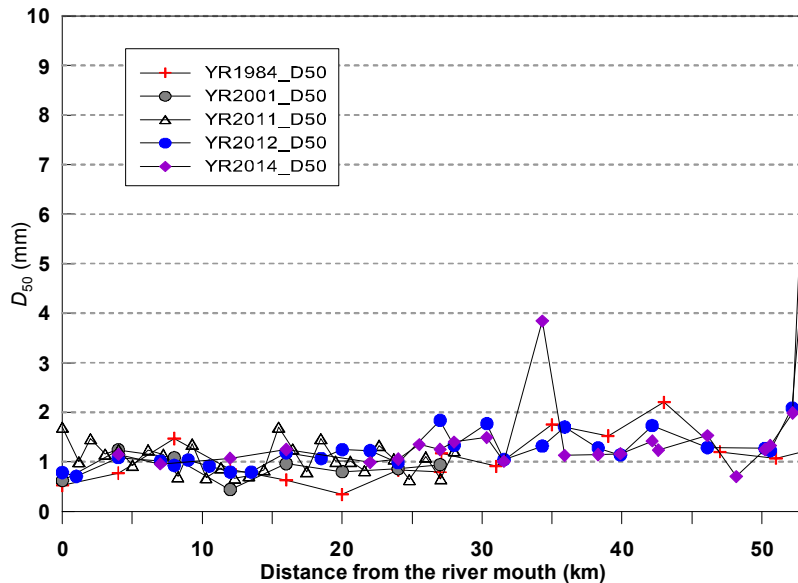


Figure 3-8 Amount of recorded sand mining since 1988. Modified from Kim & Lee(2014).

3.1.4 하상재료의 변화

Figure 3-9는 내성천 하상재료의 대표입경(D_{50} , D_{90})의 종단 변화를 나타낸다. D_{50} 과 D_{90} 모두 하류로부터 상류로 갈수록 약간씩 증가하는

경향을 나타낸다. 그림에도 불구하고 연구 구간 전체에서 모래하천의 특성은 거의 동일하게 유지되고 있다. 세부적으로 보면, D_{50} 의 범위는 1984년에 0.34~2.20 mm (평균 1.07 mm)이었으나 2014년에는 0.70~3.85 mm (평균 1.35 mm)로 나타났다. D_{90} 의 경우 1984년에는 1.39~11.95 mm (평균 4.41 mm)였으나, 2014년에는 1.29~25.5 mm (평균 5.62 mm)로 조사되었다. 변화된 평균값의 통계적 유의성을 판단하기 위해 양측검정 Student t-test를 실시한 결과 전구간의 D_{50} 평균값은 68 % 신뢰수준에서 유의한 것으로 나타났으며, 하류구간(R01~R08)만을 따로 보면 99% 신뢰수준에서 유의한 것으로 나타났다. D_{90} 은 조건에 관계없이 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다(Table 3-3). 또한 상류 구간(R09~R13)은 D_{50} , D_{90} 모두 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 요약하면 지난 30년간 내성천은 모래 하상의 특성을 유지해 왔지만, 하상재료는 중앙입경을 기준으로 과거에 비해 다소 조립화되었다고 할 수 있다.



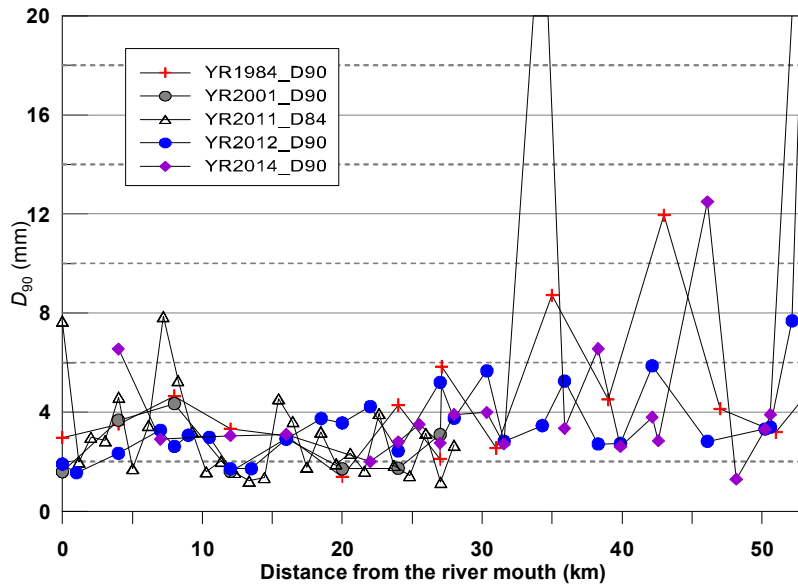


Figure 3-9 Temporal change in bed material size. Modified from KICT(2014)

Table 3-3 Bed material size for 1984 and 2014. Number of samples are shown in parenthesis.

Year	D_{50}		D_{90}	
	Whole reach	Downstream	Whole reach	Downstream
1984	1.07 (15)	0.83 (10)	4.41 (15)	3.36
2014	1.35 (22)	1.18 (11)	5.62 (22)	3.39
<i>P</i> -value	0.134	0.009	0.48	0.97

3.2 고찰

3.2.1 하폭 감소, 하상 저하, 그리고 상호연관성

본 연구에서 하도형태학적 특성에 대한 계량적 분석을 통해 내성천 하

도의 주요한 변화가 활성하도의 하폭 감소와 하상고 저하 등 주로 두 가지 측면에서 나타났음을 확인하였다. 둘 중에서 하폭의 감소를 먼저 살펴보면 이는 식생의 활착을 수반하는 홍수터 형성 과정에 의해 이루어져 왔음을 알 수 있다. Burkham(1972)와 Schumm & Lichty(1963)에 따르면 홍수터 형성의 주요한 프로세스는 선상(fan-shape) 퇴적지 형성, 하중도 형성, 배후 유로의 메워짐(filling) 등이다. 이러한 프로세스는 내성천에서도 확인할 수 있다. 1965년 위성사진을 보면 R03, R04에서는 그 이전 시기에 소규모 지류 유입부에 형성된 선상 퇴적지가 적어도 5~6곳에서 확인된다. 여기에는 식생이 1970년대부터 활착되었고 개간되기도 하였으며 하류의 그늘지(lee side)에서는 퇴적 진행되어 홍수터가 확장되었다. 또한 하중도 형성은 식생사주의 형성 및 발달 과정과 연계되는데, 내성천 하도에서 발생하는 주된 지형형성과정으로 볼 수 있다. 저수시에 노출되어 형성된 하중사주(mid-channel bar)는 식생 활착에 유리한 조건이 제공되는 터전이다(Gurnell & Petts, 2006). 일단 식생 활착이 이루어진 사주는 그 후의 수문 조건에 따라 소멸되기도 하지만 식생의 성장과 밀도 증가는 흐름 저항성을 높여 존속하며 소류사와 도약유사의 퇴적으로 인해 수직적으로 성장하여 하중도가 된다. 식생사주나 하중도에 의해 유로가 분기되면서 망류지수는 일시적으로 증가한다. 분기된 유로 중에서 주하도와 동떨어진 하중도 배후의 유로는 침수 빈도가 낮아짐에 따라 점차 퇴적이 진행되기도 하며, 그로 인해 고립된 저지 혹은 습지로 남거나 주변 홍수터에 연결된다. 내성천의 경우 하류 구간인 R03~R07을 중심으로 이러한 프로세스들이 지속되어 하폭이 감소하였다.

하상의 저하는 앞 절에서 이미 언급한 것처럼 골재 채취에 주로 기인한 것으로 볼 수 있다. 1980년대부터 2011년까지의 누적된 골재 채취량은 R01~R07 구간에서만 약 4,953,000 m³으로 이 구간의 2010년 기준 하

천공간의 면적(8,787,000 m²)을 0.56 m 만큼 저하시킬 수 있는 양이다. 허준(2017)의 자료에 따르면 상류 구간의 경우 2005~2011년의 골재 채취량은 1,673,000 m³이며, 연평균 값을 22년의 기간(1989~2011년)에 대해 산술적으로 적용할 경우 그 총량은 5,258,000 m³이며, 이는 R08~R13 구간(하천면적 5,013,000 m²)을 1.05 m 만큼 저하시킬 수 있는 양이다. 집계되지 않는 채취량까지 고려하면 하류와 상류 모두에서 골재 채취가 하상저하의 주된 요인 중 하나임은 분명하다. 이는 1990년대 이후 낙동강의 하상저하의 주된 원인을 골재 채취로 본 손광익과 지운(2015)의 연구와 같은 맥락이라고 볼 수 있다.

하폭 감소와 하상 저하의 연계성은 Schumm(1977)이 제시한 지배변수와 지형학적인 반응 사이의 관계를 나타내는 개념 모형으로 설명할 수 있다. 지배변수인 유량(Q) 또는 유사량(Q_s)의 감소는 하폭(w), 하폭수심비(w/d), 하도의 측방 이동성을 나타내는 사행파장(λ)의 감소를 야기하며, 수심(d)과 하도경사(S)는 증가하거나 감소하고, 사행도(P)는 증가한다(Eq. 3-1).

$$Q^-, Q_s^- \rightarrow w^-, d^\pm, (w/d)^-, \lambda^-, S^\pm, P^+ \quad (3-1)$$

내성천은 소규모 농업용 저수지가 있기는 하지만 본질적으로는 댐에 의한 유량 조절이나 유역간 수자원 교환이 없는 비조절하천이며 도시 개발 역시 크게 이루어진 바 없다. 따라서 지난 40여년간 지배유량의 변동성은 있겠으나 추세적인 변화는 없다고 볼 수 있다(Figure 2-8 참고). 그러므로 Eq. 3-1의 좌변에 해당하는 것으로서 하도에 부과되는 지배적인 요인은 유사량 감소라고 할 수 있으며, 이는 골재 채취 등이 주된 요인으로 작용한 것이 분명하다. 그리고 유사량 감소의 결과로서 주된 변화는 식생 활착으로 인한 하폭 감소로 나타났고 하도의 측방 이동성 역시 약화되었다(Figure 3-2).

3.2.2 변화의 공간적 차별성

내성천 하도 변화에 나타난 중요한 특징 중 하나는 공간적인 차별성이다. 1965년 이래의 망류지수의 증가, 하폭과 하폭수심비의 감소는 하류 구간인 R03~R05, R07, R08에서 가장 뚜렷하게 나타났다. 그 결과 이 구간의 내성천은 나지하중사주(bare mid-channel bar) 위주의 망류하도로부터(Figure 2-4 참고) 하중도형 망류하도로 변화되었다. 이에 비해 하류 구간 중에서 R02, R06과 상류 구간인 R09~R13에서는 지난 100여 년간 망류지수와 하폭의 변화가 없이 과거의 하도형태를 유지하고 있다.

변화가 두드러졌던 R03~R07 소구간들과 다른 소구간들 사이에 발견되는 가장 뚜렷한 지형학적 차이는 1965년 하폭으로 대표되는 하천 공간의 크기에서 나타난다. 1965년 하폭(W_{1965})은 내성천에서 연안개발사업에 의해 본격적인 제방 축조가 이루어지기 전에 자연 상태의 하천을 반영하는 하폭으로 경작지와 산사면(hillslope)에 의해 경계가 구분된다. R03~R07는 내성천 연구 구간에서 1965년 하폭이 340~470 m로 가장 큰 구간이다. 그것은 본질적으로 이 구간에서 곡사면과의 경계로서 하천 공간의 최대 폭을 의미하는 곡저폭(W_v) 자체가 넓기 때문이다(Figure 3-10). 반면에 R09~R13의 1965년 하폭은 하류 구간(R01~R08)의 58%에 불과한데, 이는 상류 구간이 홍수터는 협소하고 하도가 산사면에 면해 있는 제약형 하도(confined channel)이기 때문이다. R09~R13의 곡저폭은 1965년 하폭의 1.5배 내외로 Bisson et al.(2006)의 기준에 의하면 심한 제약형 하도로 분류된다. R02, R06의 경우 하류 구간이지만 산지를 만곡하여 통과하는데 곡저폭이 좁아서 상류와 유사한 특성을 가짐을 알 수 있다.

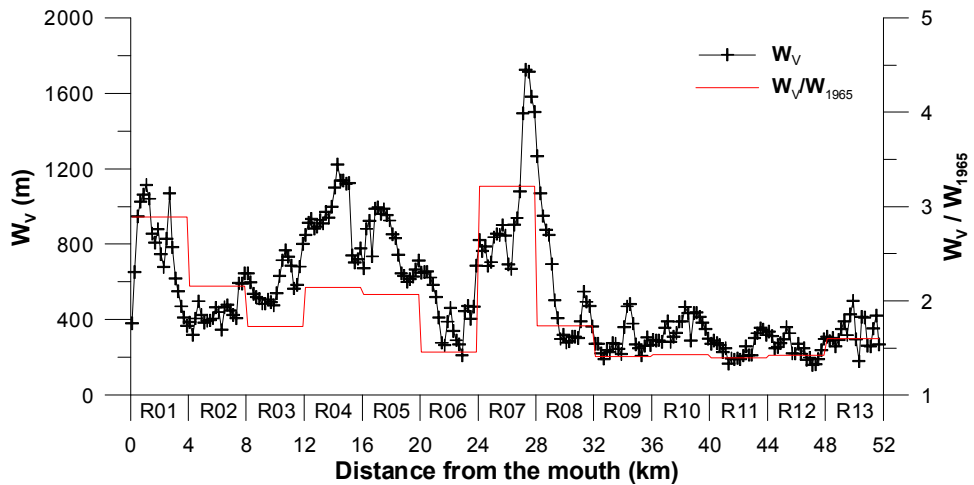


Figure 3-10 Valley width and ratio to 1965 width measured at 200 m spacing along the study reach.

Figure 3-11은 소구간별 1965년 하폭(W_{1965})의 공간적 차이가 하도형태의 변화와 어떤 관계가 있는지를 잘 보여준다. 검정색 점은 W_{1965} 와 1965~2013년의 연평균 하폭감소율을 나타내고 빈 원은 W_{1965} 와 2013년의 망류지수의 관계를 나타낸다. 상관계수의 차이는 있으나 하폭감소율과 망류지수 모두 W_{1965} 와 정(+)의 상관관계에 있는 것을 알 수 있다. 즉 하천 공간이 넓은 소구간일수록 하폭이 더 많이 감소하였고, 식생사주와 하중도의 형성이 활발하게 일어나서 망류지수가 높다는 것을 의미한다.

한편, 하천 공간의 차이와 제약 정도는 유사량 감소-하상 저하-하폭 감소로 이어지는 연계성에도 영향을 미쳤던 것으로 판단된다. 곡저가 넓은 하류 구간은 과거 유사량이 많은 조건 하에서 보다 큰 하폭 증가가 가능하였기에 근래의 유사량 감소는 하폭 감소로 이어질 수 있었으나 곡저가 좁은 상류 구간에서는 과거에도 하폭의 증가 자체가 제한되었으므로 그 감소 역시 제한되었다. 이로 인해 유사량 감소에 대한 수직적, 종적 조절은 내성천 전구간에서 가능하였지만, 횡적 조절은 그것이 가용한

공간에서만 발생하였다.

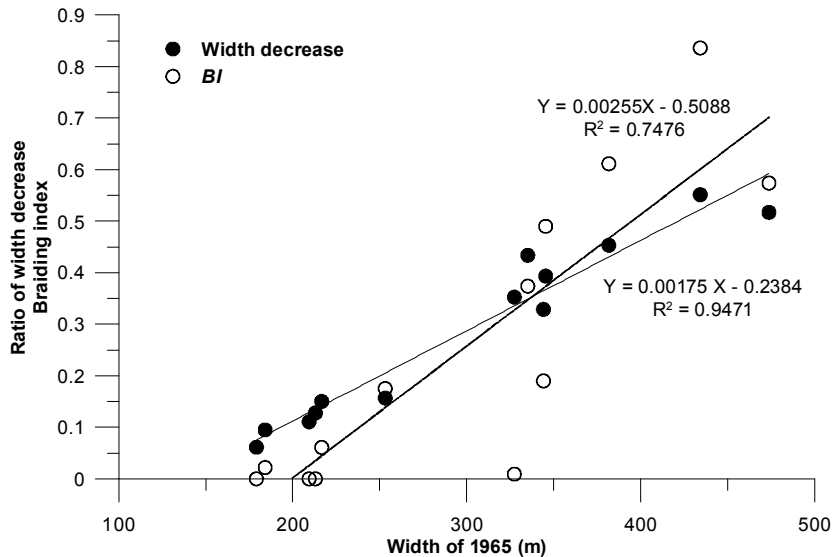


Figure 3-11 Relationship of 1965 width with ratio of width decrease during 1965~2013 and braiding index of 2013.

3.2.3 변화의 원인

내성천 하도 변화의 주된 원인은 두 가지로 볼 수 있다. 하나는 하도에 직접 영향을 미쳤던 것으로 앞서 다룬 골재 채취이다(Figure 3-8). 단순한 산술적 계산만으로도 골재 채취는 전체 구간의 하상을 평균 0.74 m 저하시키는 원인으로 작용하였다. 하천이 골재 채취와 같은 국지적인 변화를 유수의 이송 및 재배치 작용을 통해 하류 방향으로 전달한다는 점을 고려하면(Peiry, 1988), 골재 채취로 인해 유사량이 감소하였고, 이는 대부분의 구간에서 하상 저하로 나타났다.

다른 한 가지 원인은 약 0.5 m의 추가적인 하상 저하에 관계된 것으로 산림 조성으로 특징지워지는 내성천 유역의 지표피복 변화에 기인한 유

사량 공급 감소로 추정된다. 1960년대 이전의 내성천은 한국의 여러 하천과 마찬가지로 홍수시 유역과 주변 산지의 산사태에 의해 발생한 소류사의 공급이 있었는데, 이는 수목 발달이 약하고 사면이 침식에 노출된 유역의 불량한 피복 상태에 기인한다(조선총독부, 1920; 동아일보, 1967; 국제연합식량농업기구와 한국수자원개발공사, 1971). 산림이 제거된 지역에서의 산사태 비율은 성숙된 삼림의 4배에 달하며, 미성숙 삼림의 유사공급은 성숙림의 4배에 달한다는 연구를 고려할 때(Beechie et al., 2001), 당시 이러한 다량의 소류사가 공급되면서 하류 구간을 중심으로 하상이 지속적으로 상승하였고 하폭도 증가하였다. Figure 3-12의 위쪽은 R03 부근의 1971년 항공사진으로 산사면 대부분이 나지 상태를 나타내며 당시의 유역 피복 상태를 보여준다. 이에 비해 1996년 항공사진의 경우(Figure 3-12 아래쪽) 전체 산지가 밀집한 수목으로 피복되어 있음을 보여준다. 즉 1970년대 이후 산림 조성이 성공적으로 이루어진 결과(기획재정부와 한국개발연구원, 2008), 유역의 유사 발생은 감소하고 따라서 하도로 공급되어 운반되는 소류사량 역시 감소하였을 것으로 추정된다. 이는 국외의 여러 연구들에서도 보고된 바 있다(Warner, 2000; Liebault & Piegay, 2001; Boix-Fayos et al., 2007).

내성천 유역에 대한 직접적인 자료는 아니지만, Figure 3-13은 경북 지역에서 산림 조성에 의한 무림목지 감소 및 임목축적량 변화를 보여주며, 이를 바탕으로 유역의 피복 변화를 간접적으로 판단할 수 있다. 산림 조성을 의미하는 무림목지(non-stacked area)는 1950년대 이후로 계속 감소하여 왔으며, 1980년에는 이미 1990~2000년대와 비슷한 수준까지 도달하였다. 그리고 임목지의 조성 후 시간을 두고 축적량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 산림 조성은 유사 산출량과 하도의 유사량을 감소시킴으로써 내성천 하상 저하를 야기하는 또 하나의 요인으로 작용

하였을 것으로 추정된다.

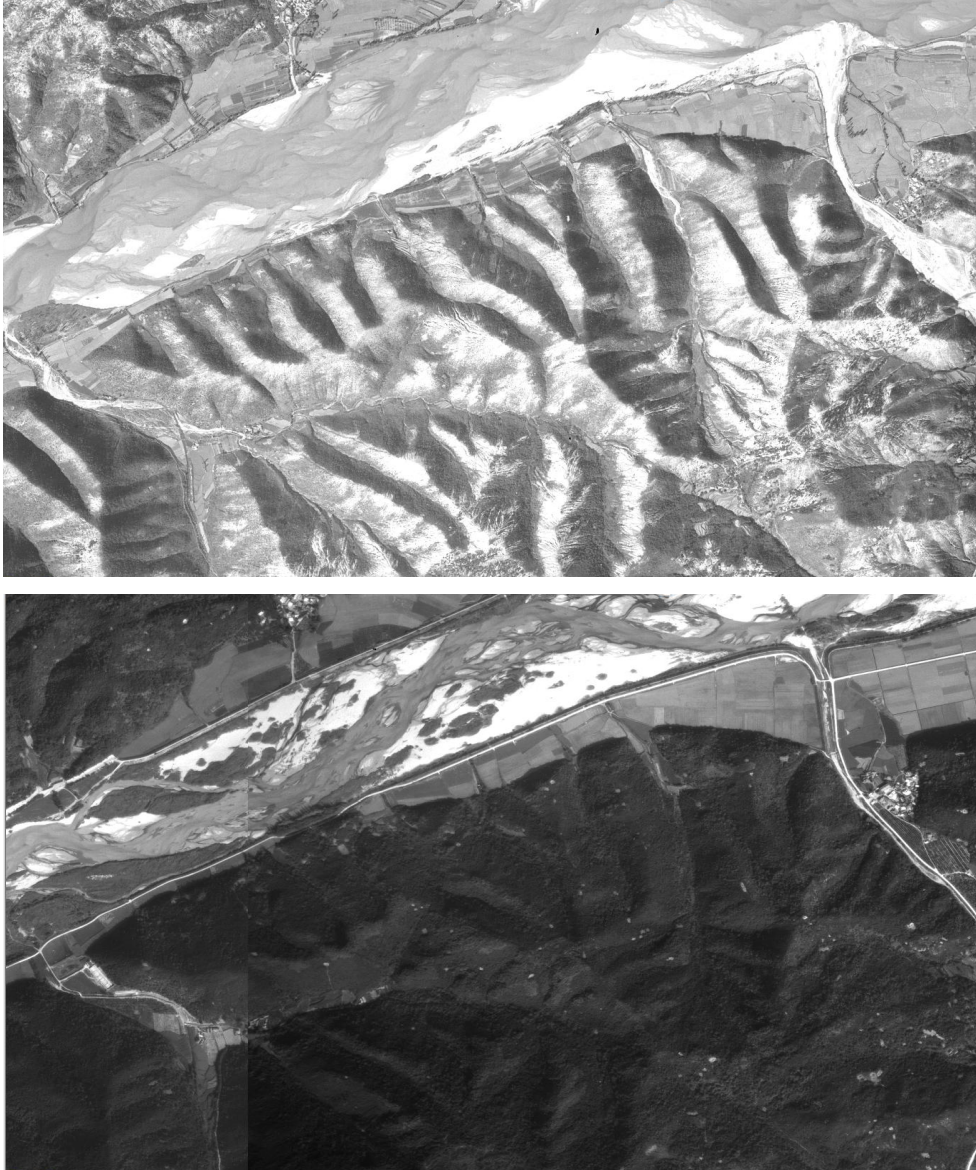


Figure 3-12 Aerial photos indicating the contrastive condition of land cover in a mountain slope near R03 in 1971 (upper) and 1996 (lower).

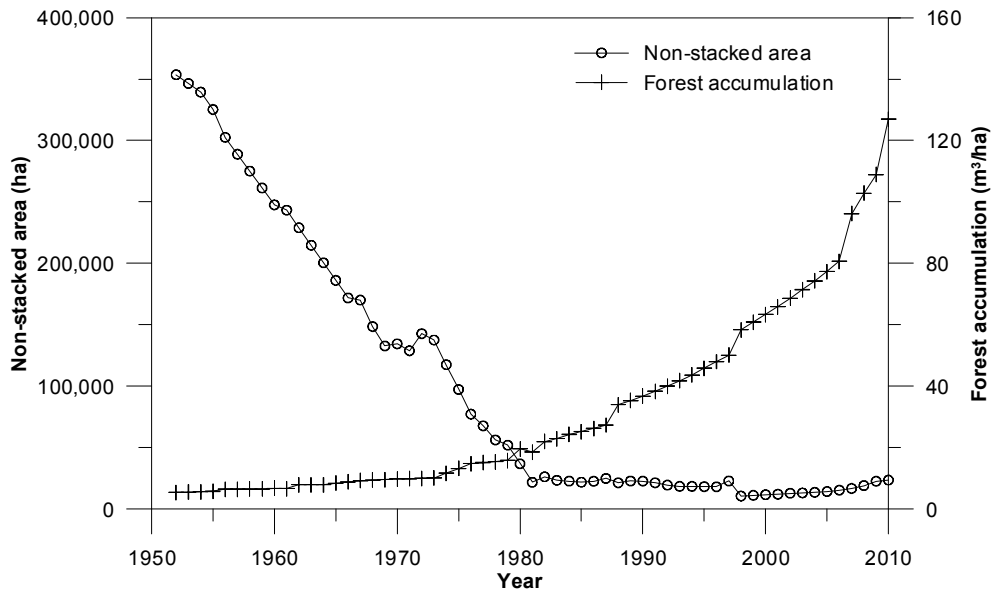


Figure 3-13 Decrease of non-stacked area and increase of forest accumulation in Gyeongbuk Province since 1950s.

3.3 결론

내성천에 대한 1915~2013년 기간의 지도 및 항공사진을 이용하여 하도형태학적 특성에 대한 분석을 실시하였으며 그 결론은 다음과 같다.

1) 내성천 하도는 1960년대 이후로 현재까지 저수 주하도의 사행도 감소, 망류지수 증가, 활성하도 하폭 및 하폭수심비 감소, 하상 저하, 하상 재료 조립화 등의 변화를 겪었다. 그 중 가장 두드러진 것은 하폭 감소와 하상 저하인데, 이 둘은 유사량 감소에 반응하는 내성천의 하도형태학적 변화로서 연계되어 나타났다.

2) 내성천 하도의 하폭 감소와 망류지수 증가는 주로 하류 R01, R03~R07 구간을 중심으로 발생하였으며, 이에 비해 상류 구간은 변화의 정도

가 적게 나타났다. 그리하여 상하류 간의 공간적인 차별성이 두드러졌다. 이러한 공간적 차별성은 하곡의 제약성을 반영하는 바 하천 공간의 규모를 나타내는 1965년 하폭과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다.

3) 내성천 하도 변화의 주된 요인은 유사량 감소이며, 이는 직접적으로는 하상에서의 골재 채취에 의해서 야기되었고, 간접적으로는 산림 조성으로 인해 유역의 유사 산출량이 감소한데 기인하는 것으로 추정된다.

4. 내성천에서 지표피복 변화의 시공간적 특징

4.1 주요 지점의 지표피복 변화 양상

지난 60여년간 내성천 하도의 지표피복의 변화에서 가장 특징적인 현상은 수역과 나지사주가 식생역으로 바뀐 것이다. 인위적인 교란에 의한 경우를 제외하면 이 변화는 1987~1988년 사이의 기간을 제외하고는 지속적으로 진행되었다. 그 결과 1960년대에 극히 적은 면적을 제외한 내성천의 97.8%가 수역(OWN)과 나지사주(BAN)로만 이루어져서 완전한 화이트리버의 특성을 보이고 있으나 2016년에는 수역과 나지사주의 면적 비율은 48.4%로 감소하였고 그 대신 초본과 목본을 포함한 식생역의 비율이 크게 증가하였다. 항공사진의 촬영시점과 관계된 수문학적 변동성을 고려하더라도 수역과 나지사주 중에서는 나지사주의 상대적인 감소폭이 더 컸다(Table 4-1). 각 구간별 상세한 변화표는 부록에 수록하였다.

Table 4-1 Proportion and shrinkage ratio of OWN and BAN

Year	OWN	BAN
1965	47.8 %	50.1 %
1988	43.9 %	45.4 %
2016	26.8 %	21.6 %
Shrinkage ratio	44.0 %	56.8 %

4.1.1 경진교 주변(R04~R05)

내성천 전체 구간에서의 지표피복 변화를 살펴보기 위해 지형학적 특

성과 인위적 교란의 영향 등을 고려하여 상류와 하류 각 2개씩 총 4개의 대표 지점에 대해 시간적 변화를 살펴보았다. 먼저 Figure 4-1은 주요 지류인 한천 합류부 부근의 R04~R05 구간에서 1965년부터 2016년까지의 7개 연도에 촬영한 정사항공사진에 식생역과 경작지를 중첩시킨 그림으로서 지난 50년간의 지표피복 변화를 보여준다. Figure 4-1에서 나지사주와 수역은 항공사진을 통해 직접 확인이 가능하므로 그대로 두었다.

전체적으로 보면 1965년에는 교량(경진교) 하류 좌안의 일부 구역에만 식생역과 경작지가 있었으나 시간이 흐르면서 점차 식생역이 증가하는 패턴을 나타내고 있다. 연도별로 보면, 1965년 경진교 하류 좌안의 식생역은 1980년에는 플랜테이션 경작지와 목본 식생역으로 변화되었다가 1987년에는 제방이 축조되면서 하천공간 외부로 분리되었다. 1987년에는 식생역은 하천 공간 전체에 산재하는 식생사주의 형태로 발생하였으며, 이로 인해 1980년 이전과는 확연한 지표피복의 변화가 나타났다. 1996년에는 경진교 하류 좌안에서 제방에 의한 식생역이 형성되었고, 하류단 부근 우안에는 식생역이 넓어졌으며, 식생사주는 유지 내지는 확대되었다. 2005년의 경우 경진교 하류 좌안과 하류단 부근 우안은 완전히 연속된 식생역이면서 홍수터가 되었다. 식생사주는 일부 없어지기도 했는데, 이는 인위적인 교란에 의한 것으로 보인다. 2013년에는 경진교 하류 좌안 홍수터는 상류 쪽으로 더 길어졌고 그 일부는 경작지로 변했다. 하류단 부근 우안의 식생역도 길게 연장되었다. 2016년에는 1996년 이래로 저수 주하도였던 수역에서 재차 좁고 긴 띠 모양의 식생사주가 형성되면서 수역은 여러 갈래, 좁은 폭의 유로로 분할되었다. 지난 50년의 식생역의 형성과 변화 과정을 요약하면 초기에는 식생사주가 산포하는 형태로 형성된 후 하도 주변부에서는 식생역이 점차 연결되고 면상으로 넓게 확장하였고, 하도 중앙부의 사주는 유지 내지는 크기가 증가하였다.

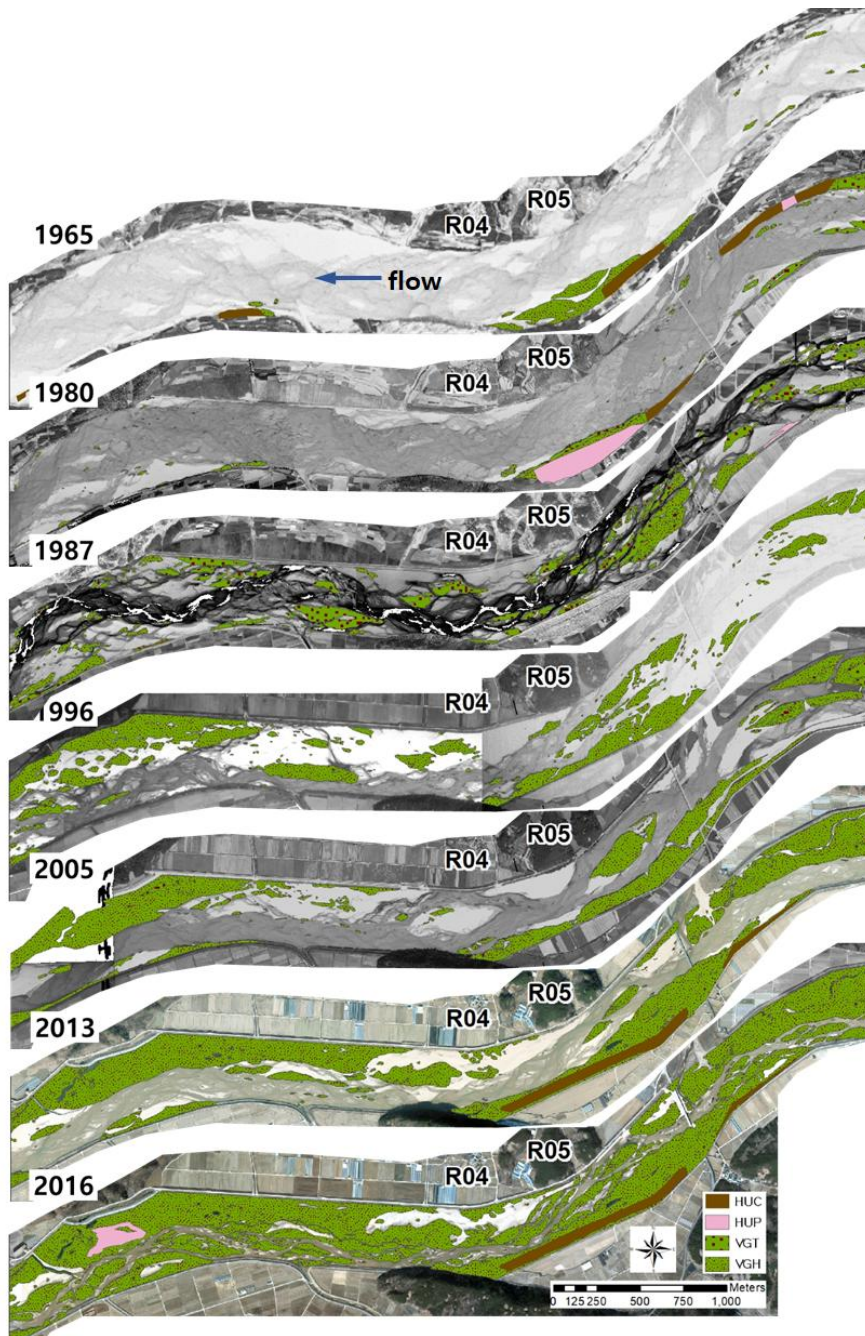


Figure 4-1 A series of ortho-rectified aerial photos with layers of classified land surface cover of vegetation and cropland along sub-reach R04~R05 during 1965~2016

4.1.2 고평교 주변(R07~R08)

고평교(상류쪽 신설 교량은 고평대교) 주변은 내성천 하류에서 제방 공사, 하상정리(식생역 제거) 등 인위적인 교란이 많았음에도 불구하고 지속적인 식생역 확대가 이루어졌음을 보여준다(Figure 4-2). 시간에 따른 변화를 보면, 1980년 이전에는 주하도에는 식생이 거의 없었으나 좌안 제방을 따라 경작지와 플랜테이션 경작지로 활용되는 홍수터가 폭 80 m 정도, 길이 1 km 이상으로 띠 모양으로 형성되어 있었다. 1987년에는 주하도의 약 40 % 면적에 식생사주가 형성되었고, 상류 좌안의 플랜테이션 경작지는 식생역으로 전환되었다. 1996년에는 1987년까지 있었던 좌안의 경작지와 플랜테이션 경작지가 없어지고 저수 주하도로 바뀌었다. 이는 하천기본계획(경상북도, 1985)에 따라 1987~1991년 사이에 이 지역(황지리)에 제방을 축조하면서 좌안 홍수터를 제거하였기 때문이다(1991년 항공사진 참조). 2005년의 경우 대부분의 식생역은 좌우안 제방에 부착되거나 근접한 상태가 되었고 식생역의 연속성이 높아졌다. 이러한 상황은 계속 진행되어 2013년에는 일부 작은 규모의 식생사주를 제외하고는 구간 전체에 좌우안은 식생역이자 홍수터로 변화되었다. 마지막으로 2016년에는 2013년에 잔존해 있던 나지사주의 상당 부분이 식생역으로 변화되었으며, 저수 주하도의 하폭이 감소하였다. 나지사주는 좌안 식생역과 수역에 인접한 식생역 사이에만 일부 나지사주가 잔존하고 있다. 한편, 2016년 영상에서 우안 상류단의 회색으로 표시된 영역은 식생역과 목초지의 식생을 제거하여 나타난 교란된 나지인데, 이 구간에서의 지속적인 교란을 보여준다.

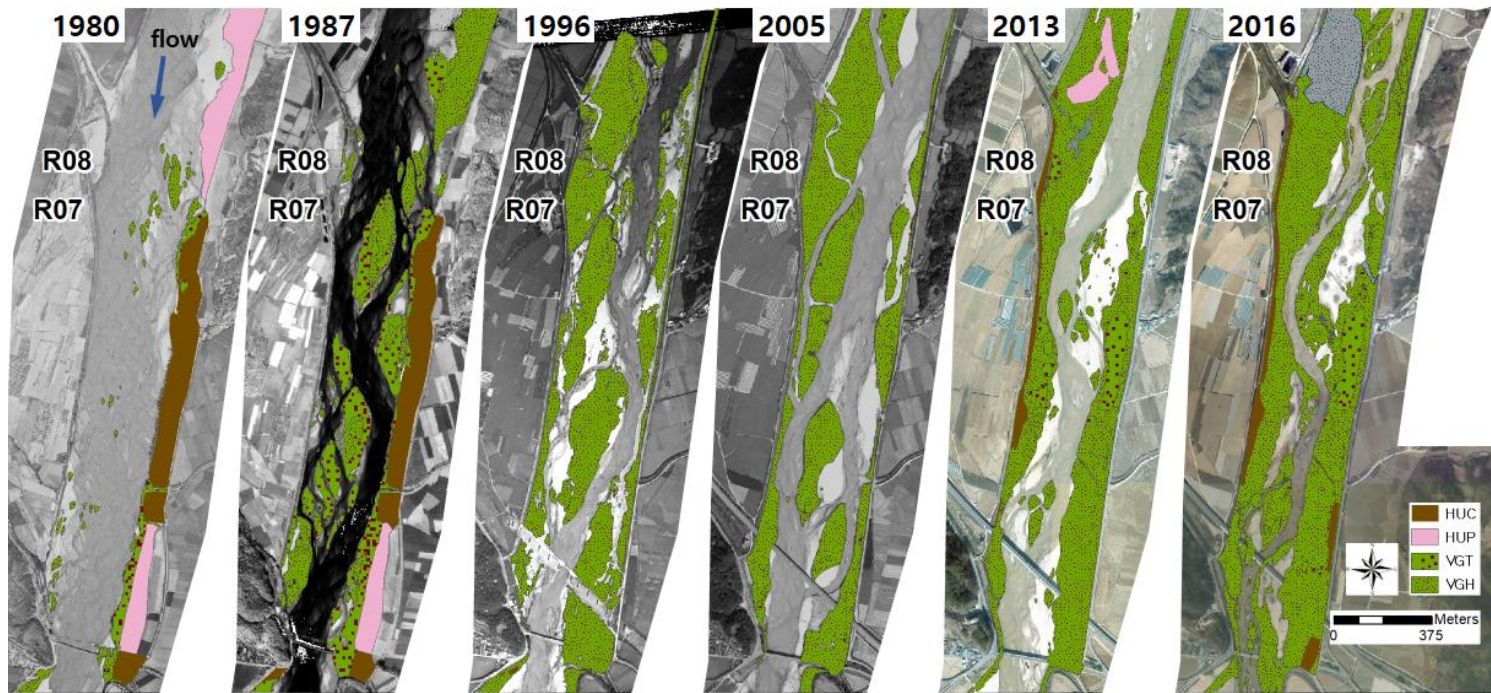


Figure 4-2 A series of ortho-rectified aerial photos with layers of classified land surface cover of vegetation and cropland along sub-reach R07~R08 during 1980~2016

4.1.3 오신교 주변(R10~R11)

오신교 주변은 상류 구간 중에 식생 활착이 상대적으로 많았던 R10과 식생이 거의 활착하지 않았던 R11을 포함한다(Figure 4-3). 1980년까지 이 구간에는 식생인 거의 없어서 하상이 단순히 수역과 나지사주로만 이루어진 전형적인 화이트리버(우효섭, 2008)의 특징을 나타내고 있다. 1986년에는 오신교 상하류에 일부 식생의 활착이 확인된다. 식생이 활착한 하중사주의 면적은 하류의 다른 구간에 비해 매우 작으나 유사한 패턴으로 식생이 활착하였다. 이와 함께 우안에서 유입하는 지류(옥계천) 직하류 우안에 식생역이 형성되었다. 1996년에는 오신교 하류 우안 쪽으로 식생역이 확장되었다. 식생 위치는 1987년과는 거의 달라서 이 두 기간 사이에 식생역의 확장이 이루어지지 않고 별도로 형성되었을 것으로 판단된다. 1996년은 중앙고속도로 교량이 건설되던 시기인데 식생이 우안의 옥계천 주변에서 활착하였음을 알 수 있다. 다만, 2005년에 이러한 식생이 제거된 것을 보면, 하상의 교란 등의 영향이 있었을 것으로 생각된다. 2005년의 경우 우안 제방을 따라 좁은 띠 영역을 제외하면 식생역은 거의 없어졌다. 하지만, 2013년의 경우 교량 하류의 좌우안에 식생역이 증가하였고, 식생사주도 형성되었다. 2016년의 경우 교량 하류 구간은 식생 활착이 크게 증가하였고, 교량 상류에서는 산재한 사주를 중심으로 식생이 활착하였으며, 그 형태는 흐름의 영향을 반영하여 길쭉한 형태를 나타내고 있다.

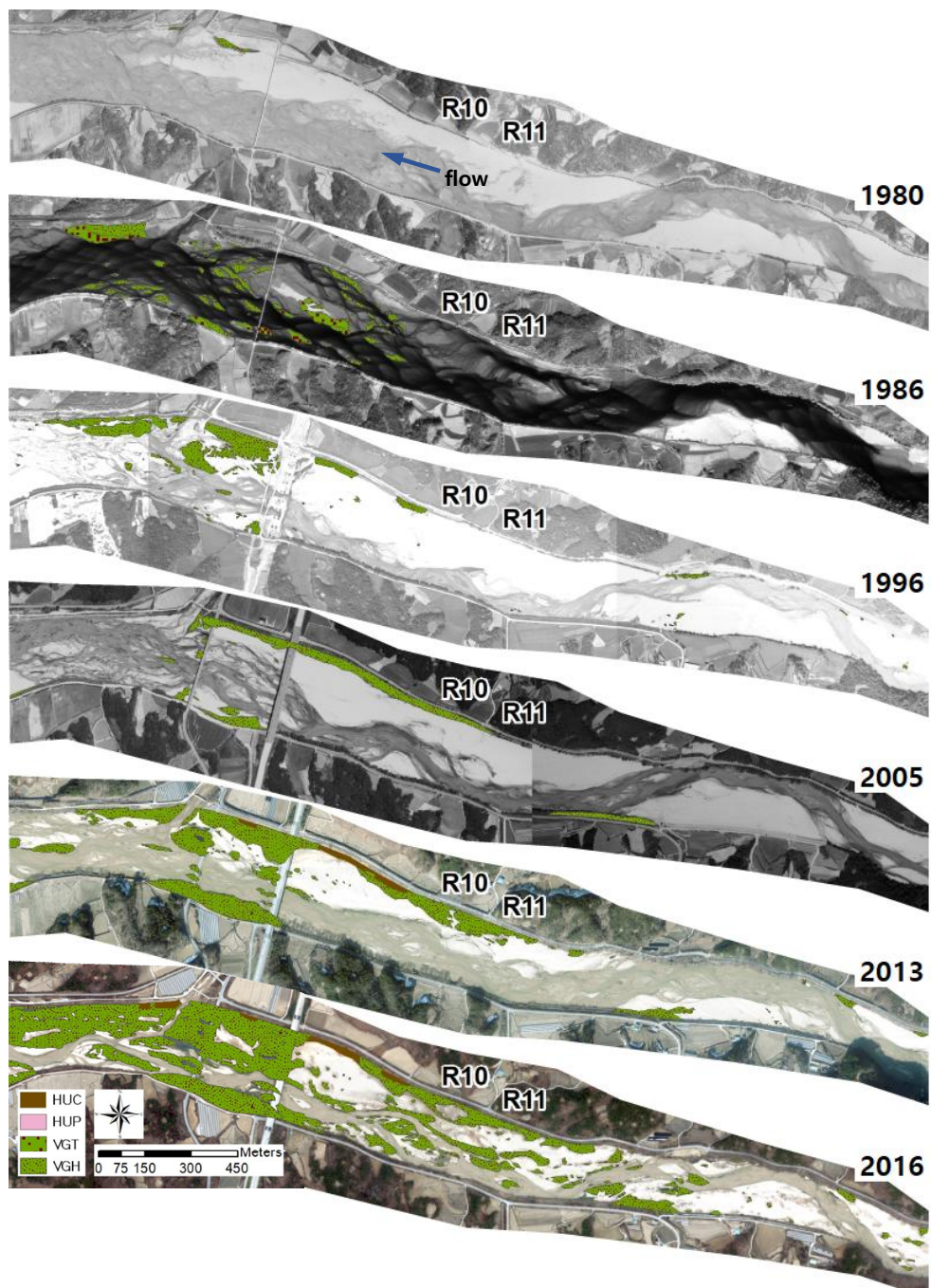


Figure 4-3 A series of ortho-rectified aerial photos with layers of classified land surface cover of vegetation and cropland along sub-reach R10~R11 during 1980~2016

4.1.4 수도교 주변(R13)

수도교 주변은 내성천 상류에서 가장 규모가 크고 급격한 만곡을 나타낸다(Figure 4-4). 특히 하류의 두 번째 만곡부는 활주사면에 그 면적이 약 130,000 m²에 이르는 대형 만곡사주(point bar)가 있어서 사질 골재 채취의 주요 지역이다. 상류의 다른 지점과 마찬가지로 1980년의 하도는 수역과 나지사주로만 구성된 단순한 하상 경관을 나타내고 있었다. 1986년에는 수도교 상류 우안과 변곡부에서 식생 활착이 확인되고 하류 사주 우안의 제방에 연한 부분에서 경작지가 병존하는 식생역이 크게 증가하였다. 이로 볼 때 이 구간이 넓은 하도 공간으로 인해 다른 소구간에 비해 식생 활착이 더 이른 시기에 시작되었음을 알 수 있다. 1996년에는 수도교 상류에는 일부 식생역이 잔존하고 하류 사주 우안의 식생역은 약간 감소하였다. 1996년과 2005년 영상에서는 하류 사주의 거의 전체 면적에서 골재 채취가 확인된다. 그리고 이는 적어도 2010년까지 계속되었는데, 이는 사주에서의 기존 식생역이 증가되지 못한 원인으로 볼 수 있다. 2013년의 경우 수도교 상류 우안에서는 하도 주변부인 제방에 연한 곳을 중심으로 띠 모양으로 식생이 활착하였으며, 2016년의 경우 수도교 상류와 하류의 큰 사주 주변으로 기존 나지사주와 저수 주하도 영역에 산재된 형태의 식생사주가 많이 형성되었다. 참고로 현장 조사 및 허준(2017)을 고려할 때, 영주댐 건설이 진행되었던 2013년 이후의 기간에는 수도교 하류 큰 사주에서 골재 채취는 이루어지지 않았다.

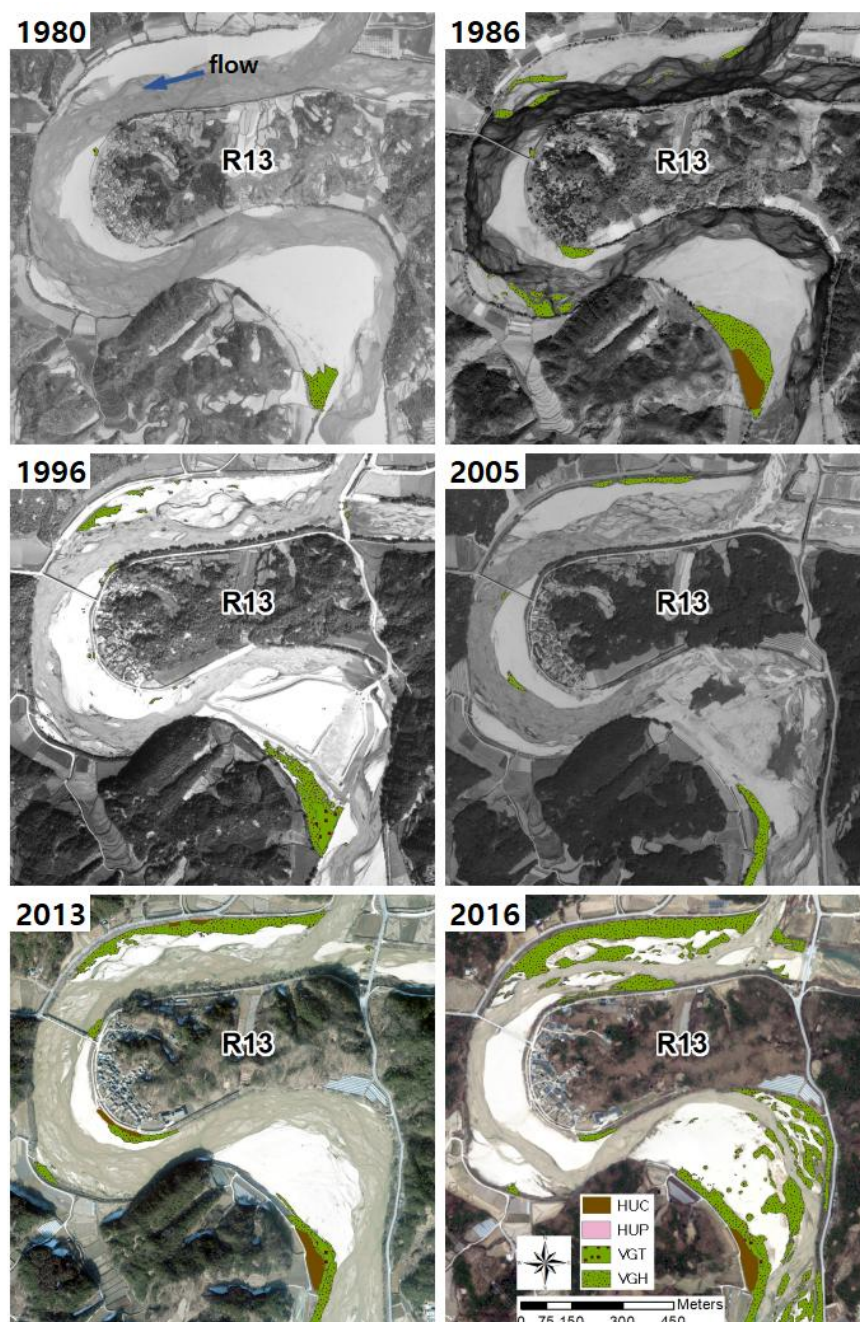


Figure 4-4 A series of ortho-rectified aerial photos with layers of classified land surface cover of vegetation and cropland along sub-reach R13 during 1980~2016

4.1.5 상하류 구간의 시계열적 변화

Figure 4-5는 각각 하류(R01~R08)와 상류(R09~R13) 소구간에서 시간에 따른 지표피복 비율의 변화를 나타낸다(구간별 상세 자료는 부록에 제시되어 있다). 나지사주에 식재되었으나 항공사진에서 초기 생장기로 판독된 플랜테이션은 나지사주로 간주하였으며, 분류의 단순화를 위해 나지사주와 초기식생은 BANV로, 초본 및 목본식생은 VGHT로, 경작지/플랜테이션은 HUCP로 나머지는 ETC로 구별하였다. 이와 함께 그래프 위쪽에는 전년도 대비 식생역(VGHT)의 증가 비율(퍼센트 포인트)을 막대로 표시하였다.

하류 구간의 경우 식생역은 1950년대에도 일부 있었으나 본격적인 첫 번째 확장은 1986/87년경에 이루어졌다. 이 때 전년대비 10%의 식생역 증가가 있었다. 이후 1995~1996년에 증가하였고 2010년까지는 1996년의 비율을 유지하였다. 2010년의 경우는 2008년에 있었던 인위적인 교란으로 인해 ETC가 증가하였다가 이후에 식생이 재확장되는 경우이다. 이후로 지속적으로 증가하였는데, 특히 2016년에는 2013년 대비 21.3%가 증가하여 비교 기간 중에 가장 큰 폭의 증가를 보였다.

상류 구간의 경우 시기적으로는 하류와 동일한 시점인 1986/87년부터 식생역의 증가가 있었으나 하지만 그 규모는 작아서 의미있는 증가로 보기가 어려웠으며 이후에도 전반적으로는 낮은 비율이 유지되었다. 다만, R13에 관한 앞절의 분석에서 언급한 바와 같이 골재 채취 등의 교란 요인에 기인한 식생역 확장 억제 효과도 작용했을 것으로 판단된다. 하지만, 2015년 이후 점진적으로 증가하였고, 2013~2016년 기간에는 뚜렷한 식생역 확장(16.5%)을 나타냈다.

요컨대, 시간적 관점에서 볼 때 상하류는 공히 1986/87년 기간에 식생

이 확장되기 시작하였다. 하지만, 하류의 경우 1987년의 식생면적 증가가 컸으며 그 후 1990년대와 2010년 이후로도 지속적인 증가가 있었던 반면에 상류의 경우 1987~2013년까지는 낮은 증가속도를 나타냈었지만 2016년에 이르러 처음으로 급증기가 시작되었음을 알 수 있다.

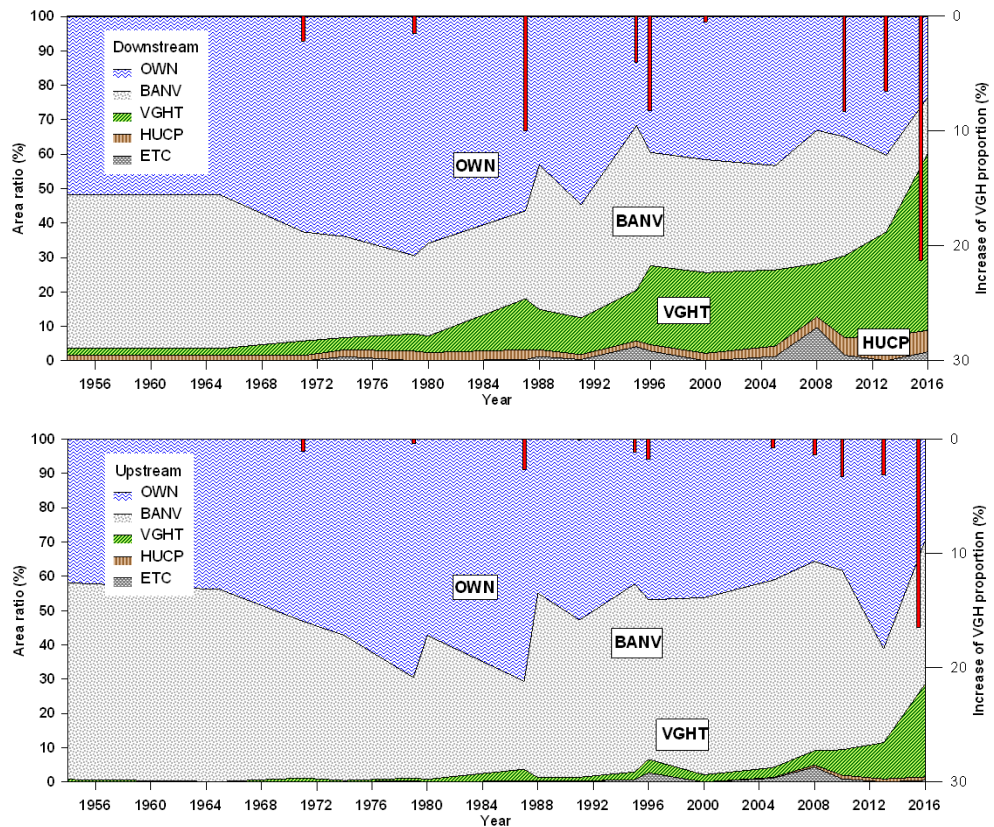


Figure 4-5 Temporal change in area ratio of different land surface cover types with increase of VGHT proportion compared to the previous period. Upper and lower are for downstream (R01~R08) and upstream (R09~R13) sub-reaches, respectively. Area ratio for downstream reach before 1965 is assumed as the same as that of 1965.

4.2 고찰

4.2.1 식생역 확장의 과정과 시기적 변화

내성천 전구간의 항공영상에 나타난 지표피복 변화의 시계열적 분석을 통해서 하도에서 나타난 식생역 확장의 과정을 ① 저수 주하도에서의 식생 하중사주 형성과 ② 제방에 인접한 하천 주변부에서의 식생역 확장 등 두 가지로 구분하여 볼 수 있다.

①의 프로세스는 식생 활착에 민감한 사질 망류하도의 특성과 직접적인 관계가 있다(Murray & Paola, 2003; Tal et al., 2004; Gurnell et al., 2005; Johnson, 2000). 내성천은 하폭수심비가 100 이상으로 저수기에는 뚜렷한 망류하천의 특성을 나타낸다. 망류하도는 저수시와 홍수시의 수문학적 변동성이 큰 조건에서 발달하며 증수시 주하도는 완전히 침수되어 유사는 지속적으로 이송된다. 유량이 감소하면 넓은 하폭수심비를 가진 하도의 특성상 수심이 얕아지면서 유속이 느린 부분을 중심으로 하나 혹은 여러 열의 하중사주(medial bar)가 형성되고 유로의 분기가 일어난다. 유량의 감소 정도에 따라 노출되는 하상의 면적이 변하므로 갈수기가 지속되면 상당히 넓은 식생역이 조성될 수 있다. 습윤한 하중사주는 수변 식생, 특히 버드나무류의 씨앗이 발아하기 좋은 조건이 되며(Kamada, 2008), 저수기가 지속되는 동안 침식되지 않은 유식물은 급속하게 성장하여 통상적인 증수로는 침식되지 않는 식생사주로 변화된다. 침식에 견딜 수 있는 수준의 유식물이 밀집하여 발달하면 후속적인 증수기에 퇴적으로 인해 사주의 수직적인 발달이 이루어질 수 있다. 상류에서 하상과의 형태로 이송되어 오는 소류사의 경우 퇴적될 경우 한 번의 증수만으로도 수십 cm 내지는 1m에 가까운 수직적인 성장이 이루어지기

도 한다(이찬주와 김동구, 2017; 이울경과 김종원, 2006). 그 이후에는 통상적인 증수로는 침수되지 않는 고도에 달하며 이후에는 도약하는 소류사나 세립질 부유사의 퇴적이 이루어지면서 안정적인 하중도로 발달하게 된다.

낙동강을 대상으로 식생의 활착을 분석한 우효섭 등(2010)에 의하면 한국의 모래하천에서 ①의 과정에 이입되는 식생은 달뿌리풀, 명아자여뀌, 버드나무류 유식물 등이다. 한국건설기술연구원(2016)의 조사에 따르면 명아자여뀌가 먼저 이입하고 버드나무류 유식물이 그 다음으로 들어온다고 하였다. 최근의 현장 관찰 결과와 1987년 항공사진에서 식생의 모양을 토대로 추론해 보면 1987년의 식생은 초기 성장단계의 버드나무류로 추정된다. 그리고 1986년의 항공사진(상류 구간)에도 같은 유형의 식생이 확인되는 점을 고려할 때 이러한 식생들은 1982~1985년 사이에 이입하였을 것으로 추정된다.

그러므로 1987년의 식생사주의 발달은 1982~1985년 기간에 하중사주에 이입한 식생이 잔존하면서 형성된 것으로 볼 수 있다. 그리고 이러한 하중사주들은 주변의 저수 유로에 의해 분리되어 있었다. 하지만, 1987년 7월(항공사진 촬영 후 1개월 이후)과 1988년 여름에 발생한 홍수로 인해 식생역은 잠시 감소하였다(Figure 4-5).

최근의 현장조사를 통해 ①의 과정이 2014~2015년 기간에 다시 한 번 발생하였음을 확인하였다(이찬주와 김동구, 2017). 2014년에는 8월까지 갈수기가 지속되었고, 그 과정에서 명아자여뀌를 위주로 한 선구식생이 광범위한 이입과 버드나무류의 발아가 시작되었다. 2015년에는 연중 홍수가 한 번도 발생하지 않은 채로 저수기가 지속되면서 하중사주에 버드나무류 유식물까지 활착하여 Figure 4-1에서 Figure 4-4에서 볼 수 있는 하중사주의 발달이 이루어졌다.

①의 과정에 의해 생긴 하중사주와 하중도 중에 어떤 것은 주변이 저수 주하도로 둘러싸여 있는 말 그대로의 하중(mid-channel) 사주인 경우도 있고, 어떤 것은 주변에 퇴적에 의해 나지사주가 형성되어 식생역만 남은 형태가 되기도 한다. 후자의 것은 차후에 주변의 나지사주에 식생이 활착하여 연속된 식생역으로 변화된다. ①의 과정은 본질적으로는 미국 Platte강에서 있었던 과정(Williams, 1978)과 같다고 판단된다.

①의 과정과는 달리 ②의 과정은 하도의 주변부에서 일어나는 과정으로 ①에서와 같은 수문조건을 필요로 하지 않을 수도 있다. 이 과정은 저수 주하도에 의해 직접 영향을 받지 않는 하도 주변부의 홍수터 형성 과정의 일환으로도 볼 수 있다(Schumm & Lichty, 1963; Friedman et al., 1996). 최심하상고 저하가 발생하면서 하도 주변부는 상대적인 고도 상승의 효과를 갖게 되며, 이로 인해 통상적인 증수에는 침수되지 않고 홍수시에도 침식력을 갖는 주흐름이 미치지 않으므로 식생의 활착이 유리한 조건이 된다. 반면에 수역과 멀고 고도차가 있으므로 받아서 수분 조건이 중요한 버드나무류 유식물 등의 활착에는 불리하다. 현장 조사 결과 하도 주변부에서는 달뿌리풀 군집이 발달하였으며, 이 군집은 제방으로부터 하도 중심부 방향으로 면적이 확장되어 가고 있다. 예외적으로 2008년의 항공사진에서 확인할 수 있듯이 인위적인 교란에 의해 하상이 노출된 후에 식생이 활착한 곳(R07의 좌안 황지리 부근)에서는 버드나무류의 밀집된 군집이 발달하기도 하였다. 이러한 하도 주변부에서 형성되는 식생역은 나지사주 내부의 식생사주 내지는 하중도와 면적으로 연결되어 연속적인 띠 모양의 식생역을 형성하며 연속적인 측면 홍수터가 된다. 이러한 식생역은 낮은 지대를 중심으로 홍수시 침수도가 형성될 경우 나지사주로 회복될 수 있지만, 그렇지 않을 경우에는 지속적으로 유지되고 천이 단계를 거칠 것으로 예상된다.

내성천 하류 구간을 위주로 볼 때, 3단계로 구별되는 지표피복의 변화 시기를 구분해 볼 수 있다. 1단계는 1986/1987년 이전의 시기로서 수역과 나지사주로만 이루어진 단순한 형태의 이른바 화이트리버의 단계이다. 2단계는 1986/87년을 전후로 식생이 활착되고 하류를 중심으로 계속적으로 식생역의 확장 및 천이가 진행되는 것으로 2013년까지 지속되었다. 2단계에는 처음에는 ①의 과정에 의해, 그 이후로는 ②의 과정이 병행되면서 식생역이 점차 증가하였다. 3단계는 2단계에서 홍수터가 형성되고 남은 저수 주하도에서 다시 ①의 과정이 시작된 것이며 현재까지 진행되고 있다.

4.2.2 공간적 차이의 주요 요인

이미 앞절에서 언급하였듯이 Figure 4-5는 내성천 상류 구간과 하류 구간의 지표피복의 변화가 크게 달리 나타남을 보여준다. 전체 13개 소구간 중에서 하류 구간 중 R02를 제외하고 R01, R03~R08에서 변화가 주로 나타났으며, 그것은 수역과 나지사주는 감소하고 경작지는 거의 변동이 없으며 식생역만 더 이른 시기부터 더 큰 폭으로 증가하였다는 것이다. 이에 비해 상류 구간(R09~R13)은 상대적으로 변화의 폭이 작았으며, 본격적인 변화가 2016년에 시작되어 늦은 시기에 발생하였음을 알 수 있다(Figure 4-5).

본 논문의 3장에서는 하류의 R03~R07 소구간에서의 망류지수의 증가와 하폭 감소가 1965년의 제방 기준 하폭으로 대표되는 하천 공간의 크기와 높은 상관성이 있음을 분석한 바 있다. 망류지수 증가와 하폭 감소는 식생역의 확장과 병행하여 나타나는 것이므로 같은 특성을 나타낼 것으로 기대된다. Figure 4-6은 각 소구간별 1965년 하폭과 식생역의 연평

균 증가율을 도식한 것이다. 예상한대로 하폭이 넓은 소구간에서 식생역의 확대 속도가 크게 나타났다.

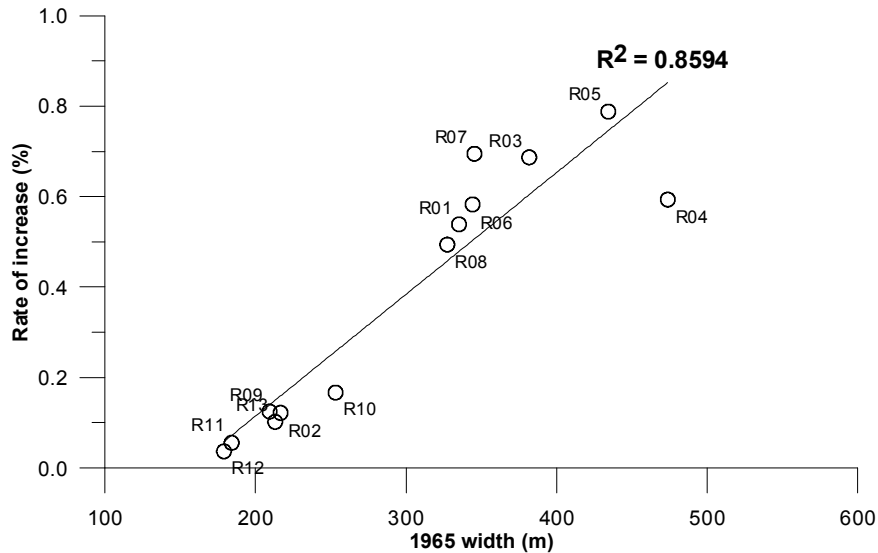


Figure 4-6 Relationship between annual rate of increase in VEG/VGT/HUC/HUP area and width of 1965.

Figure 4-6과 3장의 Figure 3-11이 보여주는 바는 내성천에서 식생역이 확대되면서 하중도와 홍수터가 형성되었고 그 결과 망류지수는 증가하고 하폭은 감소하였다. 이 두 가지 과정은 병행되어 내성천 하도의 지형 형성 과정으로 진행되어 왔다. 그리고 그러한 과정은 하천 공간이 넓은 하류 소구간을 중심으로 이루어져 왔다. 이에 비해 상류인 R09~R13 소구간은 대개는 내성천이 좁은 골짜기를 관류하는 제약형 하도 구간으로 홍수터의 발달이 미약하며 하천이 산사면에 연해 있다. 이러한 조건에서는 홍수터의 형성이 없이 하도 내의 사주만 형성된다(Alabyan & Chalov, 1998). Figure 4-6을 보면 하폭이 좁은 그룹과 넓은 그룹 사이에는 큰 차이가 있는데, 이는 충적하천에서 하류로 갈수록 하폭이 증가

하는 경향성보다 더 큰 하폭 증가가 있음을 의미한다. 또한 R02의 경우 내성천의 최하류에 가까운데도 불구하고 하폭은 230 m 정도로 하류의 다른 소구간에 비해 100 m 이상 적은 특징을 나타낸다. 이는 하폭의 차이가 충적하천의 지형형성 작용을 좌우하는 하곡의 지형 특성에 기인한 것의 의미한다. 내성천에서 식생역의 확장과 하폭의 감소가 이러한 지형학적 차이는 동일한 하천에서 식생역 확장의 공간적 차이를 야기하는 주요한 원인 중에 하나로 볼 수 있다(Williams & Wolman, 1984).

4.2.3 인위적인 교란의 영향을 받는 비조절하천에서의 지표 피복 변화

이상의 고찰로부터 비조절하천인 내성천에서 하폭이 넓은 하류 구간을 중심으로 발생한 식생역 확대라는 지표피복의 변화를 분석하였다. 식생역의 확대와 관련된 대부분의 연구들이 댐이나 유량 조절의 영향을 받는 조절하천에서 이루어졌다는 점을 고려하면 본 연구는 비조절 자연하천에서도 유량 감소라는 본질적으로 유사한 요인에 의해 식생역 확대가 이루어질 수 있음을 보여주는 사례이다. 구체적으로는 1986/87년과 2016년에 나타난 변화가 시사하는 바 지표피복 변화의 시발점은 특정한 수문학적 인 조건이 갖추어졌던 시점, 즉 다른 연도에 비해 상대적인 저유량의 홍수기가 출현한 시기에 일어난 식생하중사주의 형성에 의한 것으로 추정된다(Gurnell & Petts, 2002). 이는 또한 2016년의 식생 활착(실제로는 2014~2015년 사이에 급격한 증가가 있었다)이 내성천에 국한되어 나타나지 않고 전국적으로 나타나는 것을 통해 더욱 확인된다. 이와 함께 내성천의 지표피복 변화는 1986/87년 이후로는 화이트트리버로 회귀하지 않았으며, 식생 면적이 추세적으로 증가하는 경향은 계속되었다.

한편, 본 연구의 결과가 보여주는 것은 내성천 여러 지점에서 단속적으로 발생한 인위적인 교란의 영향으로 식생역의 추세적인 증가 속에서도 지표피복의 시간적 변화는 왜곡되어 나타났는 것이다. Figure 4-1부터 Figure 4-4, 그리고 다른 지점 및 다른 연도의 항공사진(Table 2-3)만을 보더라도 내성천에는 1980년대 이후 제방 축조(R04, R07), 식생 제거를 동반하는 하상 정리(R05, R07), 골재 채취(R01~R04 제외한 대부분의 지점) 등과 같은 인위적인 교란이 있었다. 또한 최근까지도 버드나무류 성목의 벌채가 주요 지점을 중심으로 계속되었다. 이러한 교란은 1980년대 이후로 영주댐이 건설되기 시작할 무렵인 2010년까지 간헐적으로 발생하였으며, 식생 활착이 이루어지는 기간에 하상을 교란함으로써 해당 지점에서 활착을 억제하는 조건을 제공하거나 식생역을 제거하여 식생 면적을 감소시키기도 했다. 특히 인위적 교란 중에서 지난 1980년대 이후로 광범위하게 행해진 골재 채취는 본 논문의 3장의 고찰과 함께 고려할 때 내성천 하도의 지표피복 변화에 상반된 방식으로 영향을 미쳤던 것으로 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 식생면적의 증가(Figure 4-5)와 하폭 감소(Figure 3-4)의 추세적인 변화를 고려할 때, 내성천 하도의 개별 지점에서 단속적으로 이루어진 인위적 교란은 내성천 하도 변화의 전반적인 경향성을 바꾸지는 못한 것으로 판단된다.

4.3 결론

내성천에서 지난 50년간 나타난 하도의 지표피복의 변화 양상을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 내성천의 식생역 확장은 두 가지 과정을 통해 이루어졌다. ①은 주

로 홍수가 약한 특정한 갈수 연도에 망류하도의 하중사주에 식생이 활착되어 식생사주 및 하중도가 발달하는 과정이며, ②는 상대적으로 침수빈도가 낮은 하도 주변부 및 제방 인접지에서 식생이 활착되는 과정이다.

2) 내성천의 지표피복 변화 시기를 3단계로 구분하면, 1단계는 1980년까지로서 수역과 나지사주로만 구성된 이른바 화이트리버의 특성이 유지된 기간이며, 2단계는 1986/87년부터 시작되어 2013년까지 계속된 기간으로 하류 구간을 중심으로 저수 주하도의 식생사주 형성과 하도 주변부의 식생 활착이 병행하여 이루어진 시기이며, 3단계는 2016년에 상하류 전구간에서 다시 주하도를 중심으로 사주에 식생이 활착한 시기이다. 이러한 과정을 통해 1965년 1.6 %였던 식생 면적의 비율은 계속 증가하여 2016년에는 44.7 %에 이르렀다.

3) 2016년 이전에는 하류 구간을 위주로 식생 면적이 증가하였으며, 이는 하천 공간의 차이가 식생 활착에 영향을 미침을 의미한다. 하지만, 2014~2015년 갈수기의 영향으로 2016년에는 상류 구간에서도 ①의 과정으로 식생역이 확대되었으며, 이는 1~2년간의 홍수가 약한 갈수기 연도로도 주하도에서 하중사주를 중심으로 식생 활착이 일어날 수 있음을 의미한다.

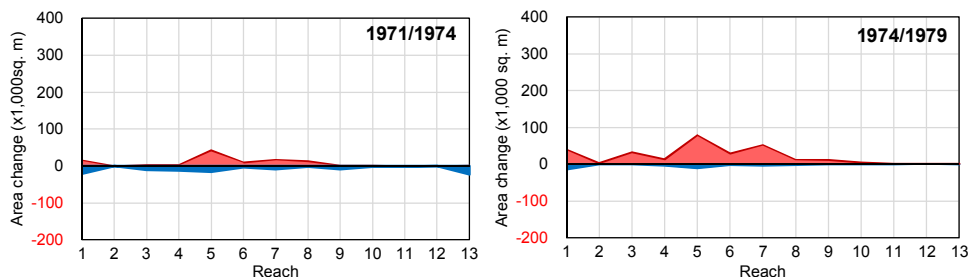
4) 내성천은 비조절하천으로서 1986/87년의 1차 식생역 급증기 이래로 식생 면적 증가가 계속되었다. 이러한 경향성은 행위 지점에서 식생 활착을 억제하는 요인으로 작용했던 제방 공사, 하상 정리, 골재 채취 등의 인위적인 교란에도 불구하고 계속된 것으로, 식생 면적 증가는 3장의 지형학적 하폭 감소와 함께 내성천 지표피복 변화의 추세적 변화임을 확인시켜 주는 것이다.

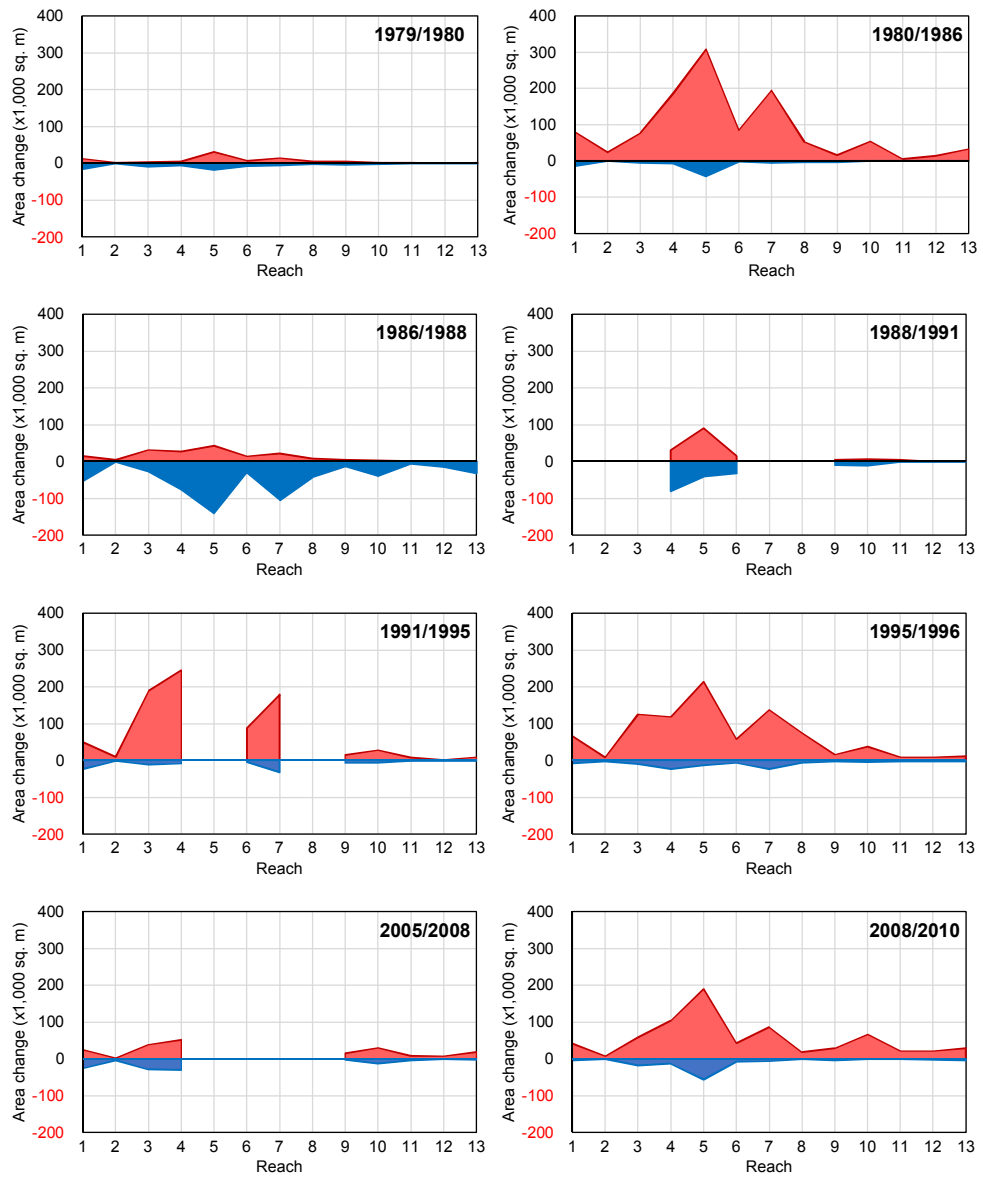
5. 다중회귀분석에 의한 지표피복 변화의 원인 분석

5.1 결과 및 분석

5.1.1 식생 면적 증감의 시계열적 특성

Figure 5-1은 비교 연도쌍별로 소구간에 따라 종속변수인 식생 면적 증가(ENCR)와 침식-재나지화(RECV)의 변화를 나타낸다. 시기를 중심으로 보면 1971~1980년까지는 하류 일부 구간을 제외하면 ENCR과 RECV 모두가 낮은 값을 나타내고 있어서 식생의 이입이 억제되고 있음을 알 수 있다. 1980~1986/87년 기간에는 하류에 속하는 R04~R05, R07 소구간을 중심으로 식생의 급격한 이입이 발생하였다가 바로 다음 기간인 1986/87~1988년에 같은 구간에서 침식-재나지화가 발생하였다. 이는 대체로 1982~1986년의 가뭄 시기 및 1987~1988년의 홍수기와 각각 시기적으로 일치하는 것으로 보인다.





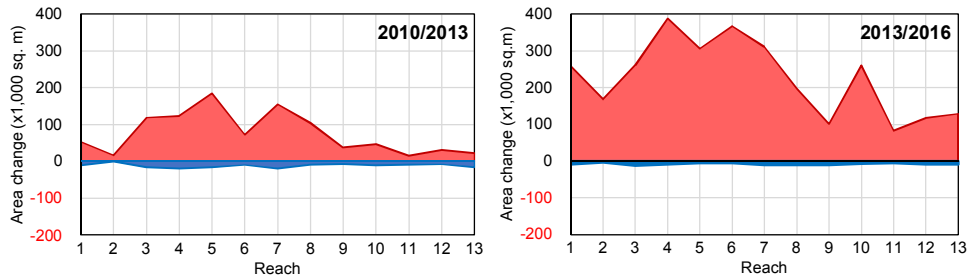


Figure 5-1 Change in ENCR (red) and RECV (blue) according to year along the sub-reaches. Sub-reaches of no value indicate exclusion due to human disturbance.

항공사진을 보면, 1988~1991년과 1991~1995년 기간은 하류의 여러 구간에서 하천 공사 등의 인위적인 교란이 많이 있었던 시기이다. 특히 큰 하중도가 있는 R05와 고평리 상류의 R08 등 두 소구간은 이 두 기간에 지속적인 교란에 노출되었다. R03~R04, R07은 1988~1991년에 교란의 영향을 받았다가 그 다음 기간인 1991~1995년에 다시 식생역이 급증하였다. 1995~1996년 기간은 짧았는데도 하류의 대부분의 소구간(R01, R03~R08)에서 식생역이 급증하는 특성을 보였다. 이 역시 앞선 기간의 교란 후에 식생이 재차 활착하는 것으로 판단된다. 한편, 1996~2005년까지는 9년이라는 긴 기간이나 자료의 부족으로 식생역의 증감을 정확하게 판단할 수는 없다. 하지만 일부 구간에 대한 위성영상을 토대로 살펴보니 이 기간에 식생 면적은 대체로 그 이전 시기에 비해 크게 증가하지 않은 것으로 나타났다. 2005~2008년 기간은 식생역의 증감은 크지 않은 반면 하류 R05~R08 소구간에서 하상 정비 위주의 교란이 발생하였다. 이후 2008~2010년 기간에는 R04~R07에서 식생역이 재차 증가하였다. 2010~2013년에는 하류를 중심으로 지속적인 식생역 증가가 있었으며, 2013~2016년에는 거의 전구간에서 식생역의 급격한 증가가 나타났는데 이는 2014~2015년의 가뭄의 영향으로 판단된다.

Figure 5-1을 시기적으로 구별해 보면, 대략 여섯 기간으로 분리할 수 있다. ① 1980년까지는 수역과 나지사주로만 구성된 이른바 화이트리버로서 식생역이 정체 내지는 미약한 변화를 보이는 시기, ② 1980~1986년 기간은 1차 식생 급증기, ③ 1986~1988년 기간은 침식-재나지화 기간, ④ 1988~2008년까지는 하류 구간에서 식생 활착과 교란 및 재나지화가 반복된 기간, ⑤ 2008~2013년은 점진적인 식생면적 증가 기간, ⑥ 2013~2016년은 2차 식생 급증기간 등으로 구분할 수 있다. Figure 5-2는 AC의 변화를 비교 연도별로 나타낸 것으로, 시기별 경향을 보여주고 있다.

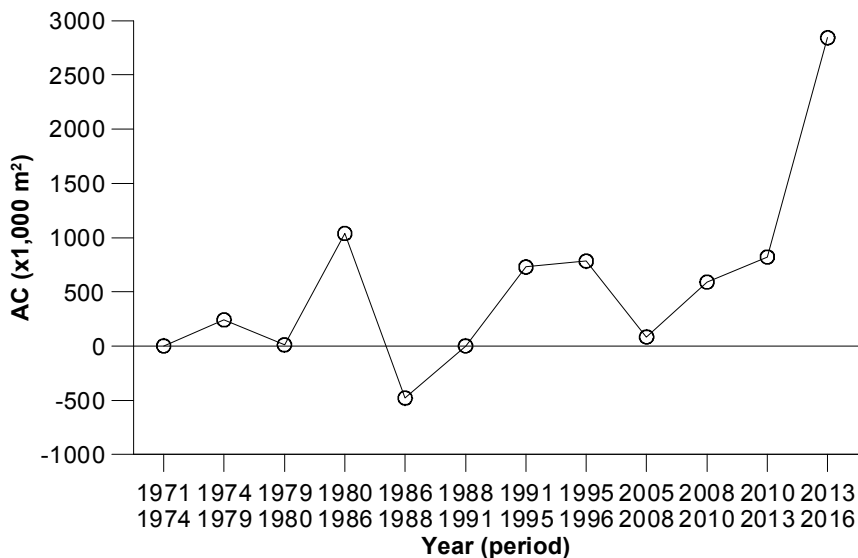


Figure 5-2 Temporal change of AC

5.1.2 소구간별 다중회귀분석

Table 5-1에는 소구간별 자료를 이용하여 구한 다중선형회귀모형이 제시되어 있다. 본 연구에서는 많은 독립변수 중에서 높은 결정계수를

갖는 선형회귀모형을 도출하기 위해서 기본적으로는 전방단계선택 기법을 적용하였다. 추가로 각 단계별로 2위 변수를 검토하여 다중회귀식이 전방단계선택 기법보다 높은 결정계수를 갖는 경우를 비교하여 회귀모형을 함께 제시하였다. 또한 각 조건별로 침투유량 변수가 포함된 회귀모형 중에서 가장 높은 설명력을 갖는 모형도 포함하였다. Table 5-1에는 최대 3변수까지만 표시하였는데, 이는 4변수 이상을 고려한 회귀모형의 경우 처음 3개 변수에서 수문, 지형, 기상 변수가 고르게 선정됨에 따라 네 번째 변수의 경우 앞의 변수들과 상관계수가 높은 변수가 추가되는데 비해 결정계수의 증가분이 상대적으로 작기 때문이다. 한편, 사용된 독립 변수들 사이의 상관계수는 $-0.61 \sim 0.38$ 의 범위에 있는 것으로 나타났다. 분산팽창계수는 $1.01 \sim 1.71$ 범위에 있어 통상적인 공선성의 판단 기준인 10 보다는 크게 낮은 것으로 분석되었다.

Table 5-1 Multiple regression models for sub-reach based analysis. p -values of all the models are below 0.01. AR : arithmetic, LN : log-transformed, * : excluding R02, ** : including R02.

Condition		Regression model for AC	df	Adjusted R^2
AR	All sub-reach	$78.43T_{AJ} + 0.457W - 0.942Q_{JJ} - 1,308$	(5-1) 142	0.685
		$96.60T_{AJ} + 0.401W - 0.0485Q_{JAKL} - 1,579$	(5-2) 142	0.636
	All sub-reach	$-56.64LQ_{JY} + 112.99LW + 56.7T_{AJ} - 1,275.89$	(5-3) 142	0.753
		$-50.55LQ_{JJK} + 108.13LW + 51.34T_{AJ} - 1,086.60$	(5-4) 142	0.729
		$-41.95LQ_{JYK} + 103.31LW + 64.14T_{AJ} - 1,334.58$	(5-5) 142	0.720
	All sub-reach (1 variable)	$-63.08LQ_{JJK} + 436.06$	(5-6) 144	0.512
		$-77.53L(Q_{JY}/W) - 57.65$	(5-7) 144	0.652
LN	R01~R08	$-69.12LQ_{JJK} + 102.96LW - 16.30LQ_{JNL} - 53.55$	(5-8) 82	0.776
		$-71.93LQ_{JJK} + 100.90LW - 13.65LQ_{JNKL} - 11.76$	(5-9) 82	0.772
		$-74.24LQ_{JJK} + 125.90LW - 18.82LQ_{JNL} - 149.30^*$	(5-10) 71	0.808
	R01~R08 (1 variable)	$-80.18LQ_{JJK} + 571.84^*$	(5-11) 73	0.730
	R09~R13	$47.39T_{AJ} - 16.17LQ_{JAKL} + 74.34LW - 1,065.5$	(5-12) 56	0.709
		$55.92T_{AJ} - 24.78LQ_{JY} + 80.17LW - 1,222.3^{**}$	(5-13) 67	0.738
	R09~R13 (1 variable)	$-67.35T_{AJ} - 1,089.69^{**}$	(5-14) 69	0.580

Table 5-1에 알 수 있는 첫 번째 특징은 대수변환값을 이용한 회귀모형의 결정계수가 산술값 모형의 결정계수에 비해 크다는 점이다. 이는 일반적인 의미에서 자연 현상에 관한 관측 결과가 내재하고 있는 지수적 특성에 기인한 것과 본 연구에 사용한 자료들의 분포가 정규성으로부터 다소 벗어나 있음을 의미한다.

대수변환값 회귀모형을 개별적으로 검토해 보면, 전체 소구간별 자료를 이용한 분석에서는 7월 평균유량(LQ_{JY}), 6~7월과 7월 첨두유량(LQ_{JJK} , LQ_{JYK})이 가장 높은 설명력을 갖는 회귀변수이며, 그 다음으로는 1965년 하폭(LW), 그리고 4~6월의 기온(T_{AJ}) 등이다. 3변수 회귀모형의

조정결정계수는 0.72~0.753 범위에 있다. 회귀모형을 통해 유량, 하폭, 4~6월 기온은 식생면적 증가와 각각 음, 양, 양의 상관관계를 보인다는 점을 알 수 있다.

하류 구간인 R01~R08 자료의 경우 세 번째 변수는 기온 대신 6월 유량 변수(LQ_{JNL} , LQ_{JNKL})이 사용되면서 결정계수가 증가하여 하류 구간에서는 6~7월의 유량이 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 특히 R02의 경우 3장과 4장에서 그 특성이 상류 구간과 유사한 것으로 분석된 바 있는데, R02를 제외할 경우 하류의 조정결정계수는 0.808로 더 높아졌다(Eq. 5-10). 또한 같은 조건에서 단일 변수로 6~7월 침투유량만을 채택하여도 조정결정계수는 0.73에 달하여(Eq. 5-11) 하류 구간에서 6~7월 유량이 식생면적 변화에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 상류 구간의 경우 첫 번째 변수는 4~6월의 평균기온(T_{AJ})으로 나타나 하류 구간과 비교하여 상이한 특성을 보여주었다. 그리고 두 번째 변수는 유량 변수인데 6~8월 침투유량(LQ_{JAKL}), R02 포함시 7월 유량(LQ_{JY})이 사용되었으며, 하폭은 세 번째 변수로 사용되었다(Eq. 5-12). 상류 구간에 대한 회귀모형의 결정계수는 0.709이며, 하류 구간 중 상류 구간과 특성이 유사한 R02 포함시 0.738로 경향성이 더 뚜렷해짐으로써 유사성이 확인되었다(Eq. 5-13). 하류 구간에서 단일변수인 4~6월 기온(T_{AJ})만으로 회귀분석을 수행할 경우 결정계수가 0.58로 상대적으로 낮았다(Eq. 5-14).

Figure 5-3부터 Figure 5-6은 Table 5-1의 회귀분석식 중에서 단일 변수식(Eq. 5-6, 5-7, 5-11, 5-14)만을 식생면적 증감 자료와 함께 보여 준다.

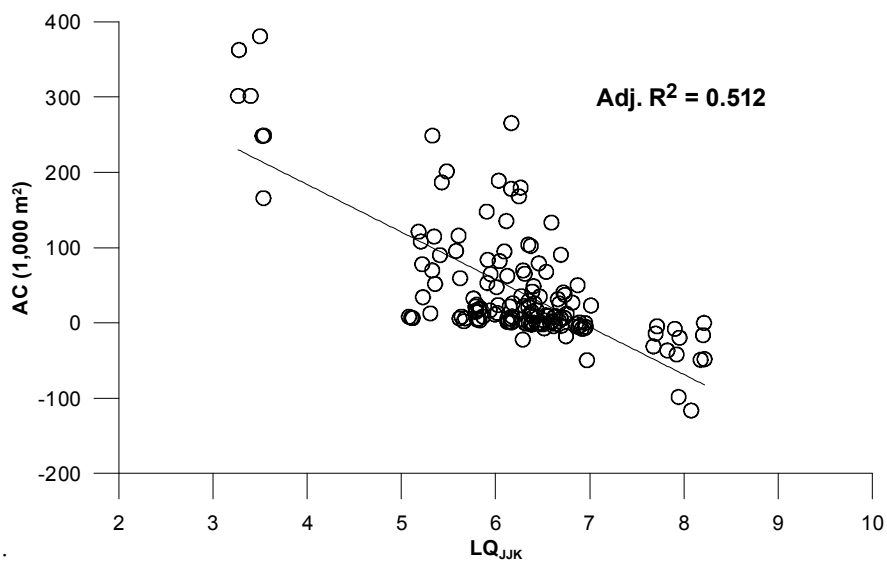


Figure 5-3 A uni-variable regression model plot between AC and LQ_{JJK} for all sub-reaches

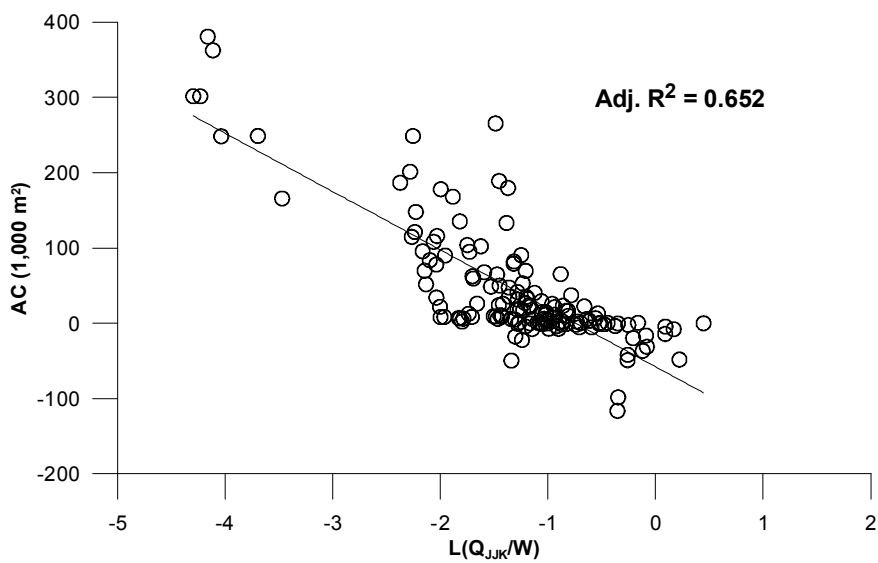


Figure 5-4 A uni-variable regression model plot between AC and $L(Q_{JJK}/W)$ for all sub-reaches

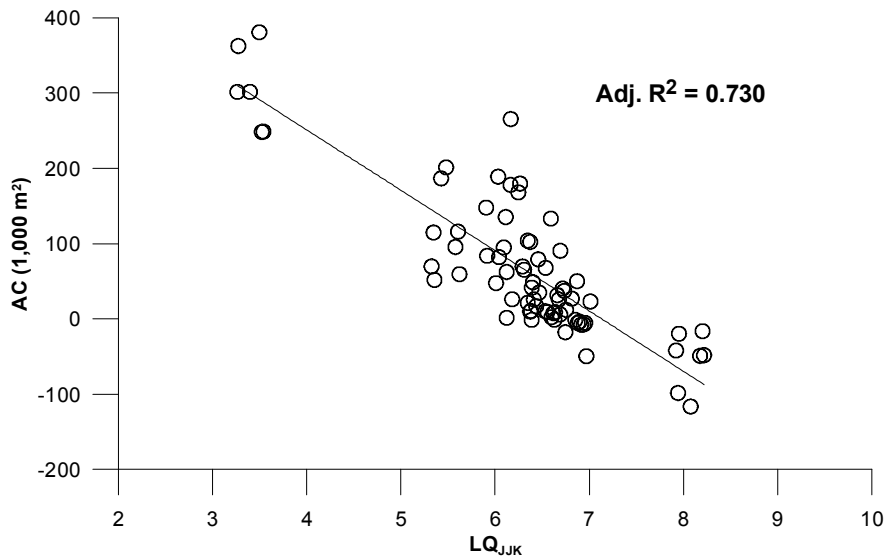


Figure 5-5 A uni-variable regression model plot between AC and LQ_{JK} for downstream sub-reaches except R02

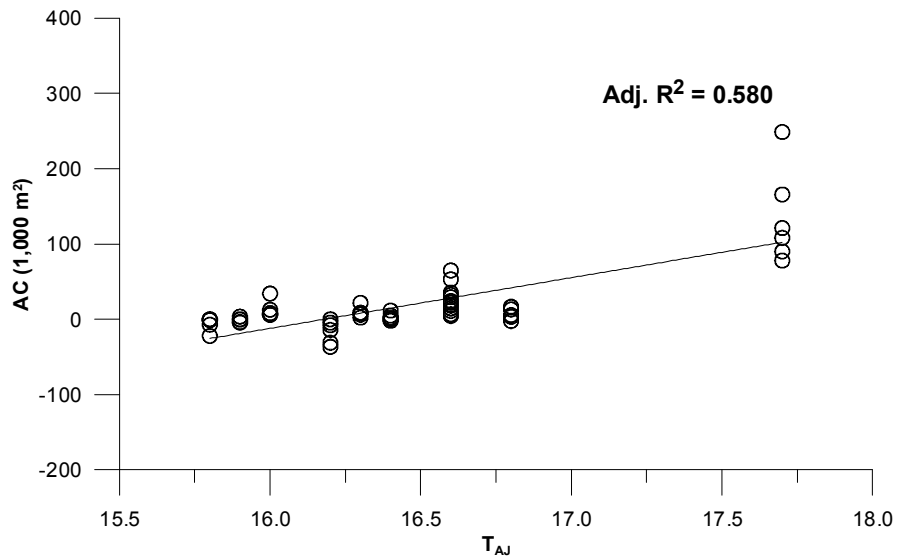


Figure 5-6 A uni-variable regression model plot between AC and T_{AJ} for upstream sub-reaches together with R02

Table 5-1에 제시한 회귀모형들은 설명력을 가지는 변수들을 보여주

며 단순회귀모형에서 독립변수가 추가되면서 설명력이 높아지기는 하지만, 각각의 변수들이 회귀모형에서 어떤 중요도를 갖는지를 알려주지는 않는다. 또한 사용된 회귀변수들은 어느 정도의 공선성은 있으므로 Table 5-1 회귀모형의 결정계수는 개별 변수의 결정계수의 합으로 계산될 수 없다. 여기서는 R 프로그램에서 패키지인 relaimp(Grömping, 2006a)를 사용하여 변수들의 상대적 중요성을 분석하였다. relaimp는 여러 가지 상대적 중요도 계산 알고리즘을 제공하는데, 그 중에서 회귀변수들 사이의 투입 순서에 따른 영향을 평균한 lmg 기법을 사용하였다. 이 기법은 회귀변수의 투입순서를 고려하면서 추가적으로 투입되는 회귀변수가 가지는 영향을 전체 회귀변수의 합집합에서 기존 회귀변수의 부분을 뺀 순수한 부분으로 판단하는 방법으로 상대적 중요도에 관한 Johnson & Lebreton(2004)의 정의에 부합되는 방법으로 알려져 있다(Grömping, 2006b). 또한 회귀변수들 사이의 상관관계로 인한 영향을 배제할 수 있는 방법이다. relaimp 함수의 자세한 내용과 계산식은 Grömping(2006a)에 제시되어 있다.

Table 5-2는 Table 5-1에 제시되어 있는 회귀모형 중에서 전체 구간, 하류, 상류 구간 등의 3개 모형(Eq. 5-4, 5-10, 5-13)에 대한 상대적 중요도(RI)와 종속변수 AC에 대한 개별 변수의 결정계수(R^2)를 보여준다. 종합적으로 볼 때, 상하류를 포괄하는 Eq. 5-4의 경우 하류의 첫 번째 독립변수인 LQ_{JK} 의 중요도가 0.502, 상류의 첫 번째 독립변수인 T_{AJ} 의 중요도가 0.3178로 나타나 상하류의 영향을 반영한다. 그리고 LW는 두 구간의 차이인 하폭(Figure 4-6 참조)을 반영하는 변수로 볼 수 있다. 여기서 LW는 자체의 결정계수보다 상당히 높은 상대적 중요도를 보임으로써 상하류의 차이로 인한 변량을 설명하는데 LW가 중요함을 알 수 있다. 반면에 $R02$ 를 상류 그룹으로 바꾼 상태에서 도출한 하류와 상류의

개별 회귀모형에서는 LW는 상대적 중요도가 매우 낮게 나타남으로써 두 그룹(하류(R02 제외), 상류(R02 포함))을 별도로 취급하여 회귀모형을 도출한 것이 의미가 있으며, 개별 그룹에서는 수문 및 기상변수가 주된 영향을 미친다는 것을 보여주고 있다.

Table 5-2 Relative importance of regressors in the three different models representing all sub-reach, downstream except R02 and upstream together with R02, respectively.

All sub-reach (Eq. 5-4)	Variables	LQ _{JY}	LW	T _{AJ}
	RI (R ²)	0.5020 (0.5155)	0.1802 (0.1055)	0.3178 (0.3980)
Downstream (Eq. 5-10)	Variables	LQ _{JJK}	LW	LQ _{JNL}
	RI (R ²)	0.8021 (0.7333)	0.0350 (0.0148)	0.1627 (0.2077)
Upstream (Eq. 5-13)	Variables	T _{AJ}	LQ _{JY}	LW
	RI (R ²)	0.6235 (0.5855)	0.3367 (0.3688)	0.0398 (0.0114)

5.1.3 전구간 다중회귀분석

전구간 분석의 경우 자료의 수가 총 12개로 상대적으로 적으며, 소구간별로 다른 지형 변수를 제외하므로 2변수 모형만을 사용하였다. 기후 변수인 강우를 수문 변수인 유량을 대체할 수 있는 변수로 판단하여 별도로 사용하였다.

Table 5-3는 유량과 강우를 각각 독립변수로 입력했을 때 P 값이 0.01 미만으로 통계적으로 유의하면서 조정결정계수가 가장 높은 2개의 식을 각각 제시하고 있다. 수문 변수인 월포 지점의 대수변환 유량(LQt)을 이용할 경우 6~7월 평균유량과 5월 평균기온의 조합(조정 $R^2=0.859$), 6~9월 침투유량의 최저년도값과 4~6월 평균기온의 조합(조정

$R^2=0.845$)이 가장 설명력이 큰 것으로 나타났다. 영주 지점의 강우량을 변수로 이용할 경우 6~7월 강우량과 5월 기온의 조합($R^2=0.831$)과 시행 착오법에 의해 얻은 6~8월 강우량과 4~6월 기온의 조합($R^2=0.892$)이 가장 높은 조정결정계수를 가짐을 알 수 있다. Figure 5-7은 Eq. 5-15에서 첫 번째 변수(LQ_{tJJ})와 AC의 관계를 도시한 것이다.

Table 5-3 Multiple regression models for whole-reach based analysis. p-values of all the models are below 0.01.

Condition	Regression model for AC	df	Adjusted R ²	
Whole reach (Discharge)	-840.6LQ _{tJJ} + 599.6T _{MY} - 6,336.3	(5-15)	9	0.859
	-527.7LQ _{tJSL} + 673.3T _{AJ} - 7,446.2	(5-16)	9	0.845
Whole reach (Rainfall)	-2028.9LR _{JJ} + 821.8T _{MY} - 1,084.8	(5-17)	9	0.831
	-2857.5LR _{JA} + 1,026.2T _{AJ} - 2,230.5	(5-18)	9	0.892

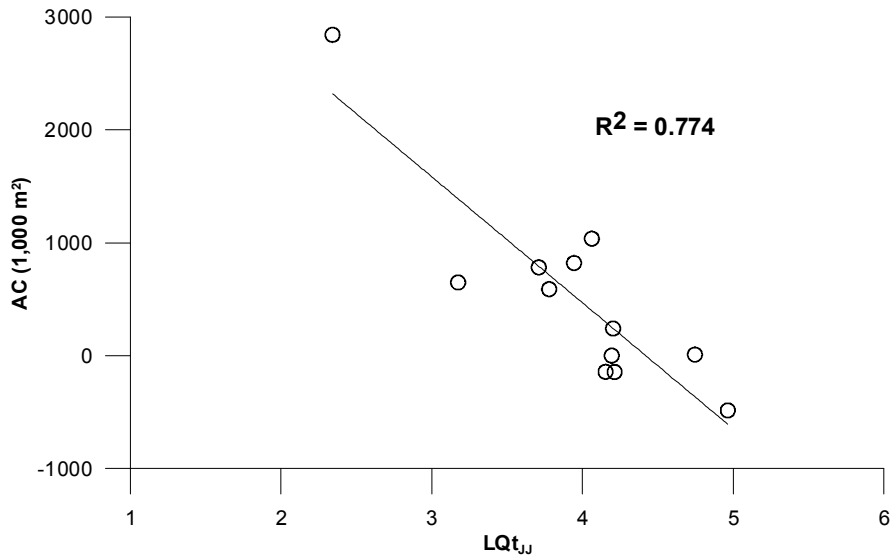


Figure 5-7 A uni-variable regression model plot between AC and LQ_{tJJ} for whole reach in whole-reach analysis

5.2 고찰

5.2.1 장마철 홍수의 영향

이상의 결과를 종합해 볼 때 식생면적의 증감에 미치는 주요한 변수는 여름철 중 장마철에 해당하는 6~7월의 유량(평균유량 및 홍수량)과 하천 식생의 활착 기간인 4~6월 사이의 기온임을 알 수 있다. 그리고 전 구간분석에서 보여주는 바와 같이 여름철의 강우량은 유량을 대체하는 변수로도 사용될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 5~6월 사이에 종자산포와 발아가 이루어진 유식물이 초기 성장 단계인 장마기에 유량 증가로 인한 침식과 매몰로 인해 활착이 억제될 수 있으며, 반대로 이 기간을 지나서 성장하였을 경우 증수를 견디고 식생이 활착상태를 유지할 수 있음을 의미한다. 내성천 현장에서의 식생 모니터링 결과에 따르면 2013년에는 6월 20일경 발생하였던 한 번의 홍수 사상 이후로 홍수가 없었으나 식생 활착이 거의 이루어지지 않은 반면, 2014년의 경우 처음 홍수가 8월에 발생하였고, 이미 활착한 식생의 높이는 50cm를 초과하여 큰 대조를 보여주었다. 그리고 이렇게 자란 식생은 홍수시에 일부만 매몰되고 잔존하였다(한국건설기술연구원, 2014).

이러한 결과는 여름철 침투홍수가 식생활착에 영향을 미치며, 감소된 침투홍수량은 유속을 감소시켜 유식물의 제거가 약화되고 식생이 활착하는데 영향을 미친다는 기존의 이론을 확인한 것이다. 미국 서부 반건조 지역 하천에 대한 Johnson(1994)의 분석은 6월 홍수를 주요인으로 제시하였으나 우리나라의 특성상 장마철인 7월까지의 영향이 뚜렷이 반영되어 있다고 보여진다. 또한 Eq. 5-12, 5-16, 5-18 등이 나타내는 바와 같이 좀 더 넓은 범위의 여름철에 해당하는 6~9월 사이의 유량, 강우량이

변수로 사용된 것은 전반적으로 여름철의 집중호우, 태풍 등에 의한 침투유량이 식생 면적 증감과 관계가 있음을 보여준다.

5.2.2 기후 요인의 영향

본 연구의 중요한 결과 중 하나는 수문학적 특성과 함께 수변 식생의 활착 및 초기 성장기인 봄~초여름에 해당하는 4~6월 기온(또는 5월 기온)이 식생면적 증감에 미치는 영향이 통계적으로 확인되었다는 것이다. 특히 상류 구간의 경우 상대적인 중요도가 62.4%로 나타나 유량 변수에 비해 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 다중공선성 기준에는 미치지 못하지만 기온 변수가 가지는 유량 변수와의 다소 높은 상관성과 기온이 상당히 높았던 2013~2016년과 같은 특정 시기(Figure 5-8)에 의한 영향을 참작하더라도 중요한 결과라고 할 수 있다.

1981~1983년 역시 전후의 다른 기간(1973~1996년)에 비해 상대적으로 고온이면서 강우량이 상대적으로 적은 시기였는데(Figure 5-8, Figure 2-7), 이 기간에 4장에서 언급한 1차 식생 급증기가 시작된 것으로 추정된다. Räpple et al.(2017)은 회귀분석을 통해 4~9월 성장 계절의 기온은 식생 활착면적 증가와 정의 상관관계가 있음을 보였으며, 높은 성장기 온도는 지속적으로 습윤 상태가 유지될 경우 식생 활착 속도를 높일 수 있다고 주장하였다. 이는 본 연구의 결과와도 일맥상통한다. 일반적으로 봄철의 기온 상승은 기존 식생의 개화시기를 앞당기며, 이에 따라 종자산포와 유식물의 성장 시기가 먼저 시작된다. 따라서 같은 시기에 홍수가 오더라도 식생의 제거나 매몰이 상대적으로 적으며 홍수 이후에도 생존 가능성이 높아질 수 있다. 이러한 생물적 과정은 식생역 확대에 기여한다. 이는 또한 내성천 외의 한국 내의 다른 여러 하천에서

같은 시기에 나타난 급격한 식생 활착의 이유가 된다. 최광용 등(2006)은 1973~2004년 동안 우리나라의 봄철 개시일이 6일 빨라졌다는 연구를 제시한 바 있는데, 이는 내성천을 비롯한 우리나라 하천에서 수변 식생 활착의 생리학적 여건이 변화했음을 의미한다. 따라서 본 연구의 결과를 고려하면 기후 변화로 인해 봄철 기온이 상승하면, 장마철의 시기 및 유량 변동과 함께 작용하여 하천의 식생활착을 촉진시킬 가능성이 있다.

한편, Johnson(1994)의 경우 겨울철의 결빙 조건이 이미 산포되어 하상에 잔존하는 종자의 사멸에 영향을 미치는 변수라고 주장한 바 있다. 본 연구에서는 겨울철 기온을 여러 가지 독립변수로 대입하여 보았으나 4~6월, 5월 기온 이외에는 상관계수가 낮게 나타나서 관련성이 낮은 것으로 판단하였다.

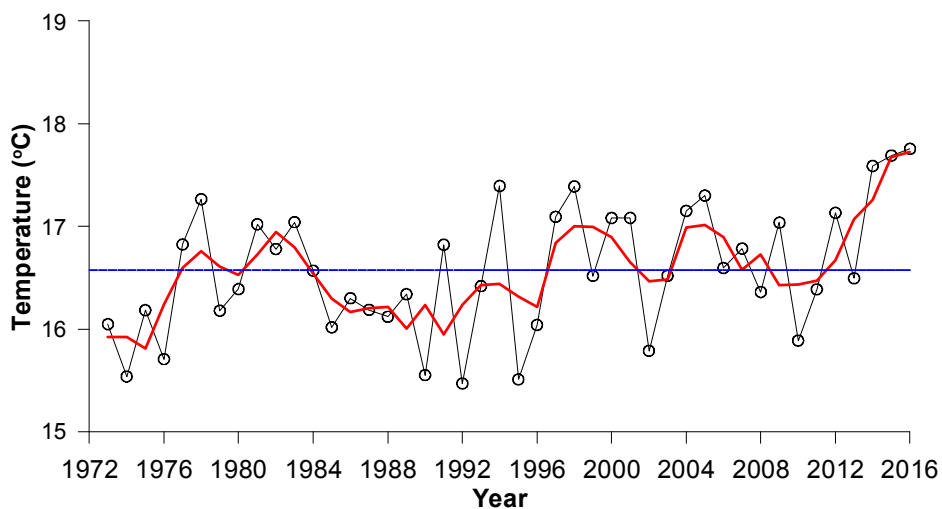


Figure 5-8 Mean temperature of April to June in Youngju. Red line indicates 3-year moving average.

5.3 결론

본 연구에서는 항공사진에서 계량화한 지표피복 변화와 수문, 기후, 지형 등 독립변수의 관계를 다중회귀기법으로 분석함으로써 보다 정량적인 관계를 파악하고자 하였다. 이는 소수의 연구(Johnson, 1994; Rappé et al., 2017)를 제외한 기존의 대부분의 연구에서 침투유량의 감소와 식생 면적 증가의 관계를 자료상의 유사성 및 경향성을 토대로 추론에 기반하여 분석한 것에 비교할 때 정량적인 관계를 수립할 수 있다는 장점을 가진다.

소구간별, 그리고 전구간에 대한 다중회귀분석을 통해 수문 변수로는 6~7월 장마철의 유량(또는 대체변수로서 강우량), 기후변수로는 4~6월(또는 5월) 기온, 그리고 지형변수 중에서는 1965년 하폭이 식생 면적 증감과 관계된 주요한 변수임을 확인하였다. 또한 내성천의 13개 소구간을 R01, R03~R08의 하류 구간과 R02, R09~R13의 상류 구간으로 구분함으로써 회귀식의 설명력을 높일 수 있었고 이 두 그룹의 구간에서 주로 영향을 미친 독립변수를 파악할 수 있었다.

이러한 결과를 3장 및 4장에서 분석, 고찰한 내용과 종합하여 일반화한다면, 수문 변수는 수변 식생 활착과 관련한 물리적 조건에 관여하는 방식으로, 기후 변수는 식생 성장의 생물학적 여건에 관여하는 방식으로, 그리고 지형 변수는 수문-식생 프로세스가 발생할 수 있는 공간적 조건에 관여하는 방식으로 작용하여 사질 망류하천의 지표피복 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 장마철에 가뭄이 발생한 비조절하천이든 인위적인 조절에 의해 침투홍수량이 감소한 조절하천이든 근본적으로는 유사한 수문-식생 프로세스가 작용함을 의미하며, 이는 역으로 장마철 유량을 적절히 조절할 수 있다면 식생의 활착 과정에 개입

할 수 있음을 의미한다.

마지막으로, 본 연구에서는 자료의 제한으로 인해 하천 시스템 내에서 식생 활착 및 하폭 감소에 관계된 유사량의 영향은 분석하지 못하였으며, 이에 대해 향후 연구가 필요할 것이다.

6. 결론 및 제언

6.1 연구 결과의 요약

본 연구에서는 과거 100여년의 자료를 이용하여 비조절 상태에서 내성천의 변화를 지형 및 지표피복의 관점에서 분석, 고찰하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

하도의 지형학적 측면에서 볼 때, 내성천에서는 1960년대 이후로 현재까지 하천 공간이 넓은 하류 R01, R03~R07 소구간을 중심으로 저수 주하도의 사행도 감소, 망류지수 증가, 하폭 감소, 하상 저하 등의 변화가 나타났다. 그중에서 가장 두드러진 것은 하상 저하와 식생 면적의 증가를 수반하는 하폭 감소로서 직접적인 원인은 유사량 감소이며, 이는 주로 하상에서의 인위적 교란인 골재 채취와 산림 조성으로 인한 유역의 유사 산출량 감소에 의해서 야기된 것으로 추정된다.

1965~2016년간 내성천의 지표피복 변화는 하천 공간이 넓은 하류 R01, R03~R08 구간을 위주로 나타났고, 시기적으로는 i) 1980년대 이전의 화이트리버 시기, ii) 1986/87년경에 시작되어 2013년까지 계속된 식생역 확장기, iii) 2013년 이후 전구간에서 식생 면적이 증가한 2차 확장기 등으로 구별되었다. 식생 면적의 확장은 i) 망류하도의 하중사주에 식생이 활착한 후 식생사주 및 하중도로 발달하는 과정과 ii) 상대적으로 침수빈도가 낮은 하도 주변부에 식생이 활착되는 과정 등을 통해 이루어졌으며, 1986/87년과 2016년의 식생 급증기는 비조절하천에서도 홍수가 약한 갈수기 연도에 i)의 과정을 통해 식생 활착이 이루어질 수 있음을 보여주었다.

식생 활착과 관련된 내성천 하도의 지표피복 변화에 관여하는 주요 원인을 정량적으로 분석하기 위해 다중회귀분석을 실시하였으며, 그 결과 장마철인 6~7월 유량과 그 대체 변수인 강우량, 그리고 식생의 초기 성장기인 4~6월 기온이 식생면적 증감에 영향을 미치는 주요한 변수임을 확인하였다. 또한 1965년 하폭은 하류 구간(R01, R03~R08)과 상류 구간(R02, R09~R13)을 구분하는 지형학적 변수로 나타났다. 이는 수문 변수는 식생 활착의 물리적 조건에 관여하는 방식으로, 기후 변수는 식생 성장의 생물학적 조건에 관여하는 방식으로, 지형 변수는 공간적 제약 조건으로 작용하여 식생 면적의 변화에 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다.

6.2 종합 고찰 및 결론

6.2.1 사질 망류하천에서의 수문-지형-식생 연계성

본 연구에서 하도의 지형학적 변화와 함께 지표피복 변화의 과정과 그 주요 원인을 분석한 것은 수변 식생이 하도의 지형형성 및 하폭 감소에 능동적인 역할을 수행하기 때문이다(Räpple et al., 2017; Gurnell & Petts, 2002; Gurnell & Petts, 2006). 식생은 유성 및 무성 생식, 성장과 천이를 포함하는 생물적(biotic) 프로세스를 통해서는 하천 내의 공간을 차지하고 지표피복을 변화시킨다. 식생은 비생물적(abiotic) 프로세스로서 유수에 대한 저항 요소로 작용하여 유속 감소와 유사 퇴적을 유도하며(Hickin, 1984), 지형의 응집성을 높여(Tal et al., 2004) 하중도와 강턱을 형성하여 하폭을 감소시킨다. 수문학적으로 변동성이 크고 넓은 하천 공

간이 확보된 조건 하에서 형성되는 사질 망류하천은 이러한 변화가 가장 활발하게 일어날 수 있는 조건을 갖추고 있으며(Gurnell & Petts, 2002), 본 연구는 내성천에서 그러한 변화가 일어났음을 보여주고 있다.

하천은 하도를 따라 흐르면서 유사를 이송하고 형성하는 유수의 물리적 프로세스와 거기 서식하면서 생물적, 비생물적 양식으로 작용하는 식생 프로세스의 역학 관계가 작용하는 공간으로 하도의 형태는 두 프로세스의 상호관계에 의해 결정된다. 유역에서는 기온이 상승하고, 하천의 유량과 유사량이 감소하면 물리적 프로세스는 약화되는 반면, 식생 프로세스는 활발하여 하폭이 감소한다. 반대로 기온이 낮아지고 홍수의 규모가 증가하거나 토석류 등으로 인한 유사량 공급이 증가함으로써 물리적 프로세스가 크게 작용하면 식생 활착 여건은 악화되고, 기존의 식생도 인발되거나 매몰됨으로써 하폭은 증가한다. 안정적으로 유지되는 하폭은 이 두 부문 사이의 균형을 반영한다(Figure 6-1).



Figure 6-1 Conceptual model describing channel morphology being governed by dynamic relationship between physical and vegetational processes.

본 연구의 결과가 보여주는 것은 이러한 수문-지형-식생 연계성과 그것에 미치는 지배요인의 관점에서 볼 때 1960년대 이후 내성천에서 일어난 변화는 골재 채취와 산림 조성에 기인한 유역 유사량 감소로 인해 유사량이 지속적으로 감소함으로써 물리적 프로세스가 식생 프로세스에 비해 상대적으로 약화되는 추세적 특성을 나타냈다는 것이다. 그에 따라

내성천은 과거의 수역과 나지사주로 구성된 화이트리버로부터 식생이 활착된 하중도와 홍수터가 있는 하도 형태로 변화되었으며 이는 1980년대 이래 단속적으로 이루어진 인위적 교란에도 불구하고 지속되었다. 그리고 그 과정에서 1980~1986년 사이와 2013~2016년 사이에 발생한 상대적 가뭄 기간은 높은 성장기 기온과 더불어 식생의 생물적 프로세스를 크게 촉진하는 조건을 제공함으로써 하중사주를 중심으로 식생이 급증하는 계기를 마련하였다.

6.2.2 비조절하천 연구의 의미

내성천은 영주댐이 건설, 담수되기 전인 2016년까지는 비조절하천이라고 볼 수 있으므로 비조절하천의 장기적 변화의 특성을 댐에 의해 조절되는 한국 내의 다른 하천에 관한 연구(우효섭 등, 2010; 박봉진 등, 2008; Choi et al., 2005; Woo et al., 2015) 등과 비교해 볼 수 있다. 이는 다목적댐 이외에도 다양한 규모의 농업 수자원 개발 등의 영향으로 순수한 의미의 비조절하천이 드문 현실에서 하천 변화의 지배요인을 파악하는데 중요한 의미를 가진다. 양쪽의 조건에서 공통적인 특징은 일시적이든 지속적이든, 자연적인 수문학적 변동성에 의한 것이든 인위적인 조절에 의한 것이든 수변 식생에 관한 수문-식생 연계성은 초여름(장마철) 홍수와 관련이 있다는 것이다. 반면에 차별적인 점은 조절하천에서는 댐의 유량 조절과 유사량 차단 효과가 극대화되어 같은 시기에 있음직한 다른 지배요인의 영향을 댐의 영향과 분리해 내기 어려운데 비해 비조절하천에서는 유사량 감소로 인한 하상 저하 및 식생 활착을 동반하는 하폭 감소와 같은 하도의 장기적인 변화를 그에 관여하는 지배요인으로 하도에서의 골재 채취나 산림 조성으로 인한 유역 유사 산출량의

감소와의 상호관계 속에서 파악하는 것이 보다 용이하다는 점이다. 이는 역사적으로 볼 때, 20세기 이후 유사한 유역 변화를 겪은 다른 비조절 상태의 국내 하천에서 일어난 변화들을 이해하고 해석하는데 많은 도움이 될 것이다.

6.2.3 결론

이상의 모든 논의를 종합하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있겠다.

지난 1960년대 이후의 내성천의 변화는 하도지형학적 측면으로는 하상 저하와 1965년 하폭이 넓은 구간을 중심으로 한 하폭 감소로 나타났고 지표피복 측면으로는 식생역이 확대되는 것으로 나타났다. 이 두 가지 측면의 변화는 하천의 조절 과정의 결과로서 수문-지형-식생의 상호 연계성 속에서 이루어졌다.

내성천 하도의 변화를 야기한 직접적인 요인은 물리적인 측면의 지배 요인인 유사량의 지속적인 감소이며, 이는 하상에서의 골재 채취(인위적인 교란)와 산림 조성(유역 토지피복 변화)에 기인한 유사 공급량 감소로 인해 야기된 것으로 추정된다.

하도 형태의 지배요인 중에 하나인 유량의 관점에서 볼 때, 내성천 유역은 수문학적 특성이 추세적으로 변하지는 않았으나 유량의 연도별 변동성과 관련하여 1980~1986년과 2013~2016년 기간과 같은 특정 가뭄 시기는 식생의 성장을 촉진할 수 있는 기온의 상승과 함께 식생 면적의 확장기가 시작될 수 있는 여건을 제공함으로써 식생면적 증가 및 하폭 감소의 과정에 영향을 미쳤다.

결론적으로 내성천의 장기적 지형 및 지표피복의 변화는 1970년대 이래로 이루어져 온 유역 관리(산림 조성)와 하천 정비(골재 채취 및 교

란)가 지속됨으로서 유사량이 감소하는 가운데 자연적인 기후, 수문의 변동성이 복합적으로 작용하여 초래된 것으로 볼 수 있다.

6.3 하천관리상의 제언

본 연구의 결과와 그에 대한 고찰로부터 하천 관리와 관련하여 다음과 같은 제언을 할 수 있겠다.

첫째, 내성천이 겪은 장기적인 하도 변화는 현재의 한국의 하천이 산림조성이 이루어지기 전, 산업화와 개발을 위한 하천의 인위적 교란이 이루어지기 전인 1980년대 이전의 상태와는 크게 달라진 유역 환경에 적응하는 하천의 조절 과정임을 이해하는 것이 필요하다. 이는 하천에서 나타나는 하상 저하, 하중도와 홍수터 형성을 수반하는 하폭 감소가 유사량 감소에 수반되는 하천지형학적 과정이므로 식생 하중도나 홍수터를 인위적으로 제거하여 하도로 환원하는 단순한 하도 정비는 지속가능성이 낮으므로 지양되어야 함을 의미한다.

둘째, 내성천의 하상 저하는 유사량 감소에 기인하는 것으로, 그 주요 원인 중 하나는 골재 채취이다. 게다가 영주댐은 유사량을 차단하므로 하도에서의 유사량 감소를 가중시키고 그 결과 하상 저하 및 하폭 감소가 심화될 가능성이 있다. 또한 하상재료의 조립화, 하상의 장갑화가 병행될 수 있다. 이러한 상황에서는 고유한 모래하천 경관 역시 변화될 수 있다. 따라서 향후 유사량 변화에 대한 정량적인 연구를 기반으로 모래하천의 고유한 지형 경관을 유지하기 위해 저수지 퇴사의 하류 방류, 댐 하류 골재 채취의 제한 등 대책 수립이 필요하다.

셋째, 본 연구에서 제시하는 식생 활착의 수문, 기후 조건을 고려하여

당해 연도의 식생 활착 가능성을 예상할 수 있다. 사질 하상의 경관을 유지하는 목적을 달성하기 위해서는 식생 활착 초기에 하도 관리 및 방류량 조절 등을 통해 선제적인 대응을 할 필요가 있다.

넷째, 내성천 하천 전구간을 획일적인 방식으로 관리하는 것보다는 소구간을 적절히 분할하고 각 소구간별로 역할을 분담하는 방식으로 목표를 수립하여 하천을 관리할 필요가 있다. 예를 들면, 회룡포, 수도리, 선몽대와 같은 경관 지구는 식생 활착 억제 및 하상 저하 방지, 하폭이 좁은 소구간은 식생 및 수림화 관리를 통한 통수능 확보, 하폭이 넓으나 하중도 형성으로 유로의 분기나 사행이 심한 소구간은 지형 관리를 통한 제방 등 시설물 안전성 확보, 골재 채취 구간은 하상 저하의 최소화를 위한 재퇴적 유도 등 세부적인 목표를 수립하여 추진할 필요가 있다.

참고문헌

- 건설교통부부산지방국토관리청, 2001, 내성천하천정비기본계획(변경)
- 건설부, 산업기지개발공사, 1978, 낙동강연안개발사업하천개수 및 부대
시설공사(1단계) 실시설계보고서, 151p.
- 건설부, 1984, 낙동강(내성천, 감천) 하천정비기본계획.
- 경상북도, 1985, 내성천하천정비기본계획.
- 구영본, 여진기, 신한나, 정성호, 2010, 포플러, 국립산림과학원
- 국립산림과학원, 2010, 보도자료(8월 26일)
- 국제연합식량농업기구, 한국수자원개발공사, 1971, 낙동강 유역 토지 및
수자원 개발 계획, 제5권 토양, 식생 및 침식, 대구
- 국토해양부부산지방국토관리청, 2013, 내성천권역(하류)하천기본계획(변
경)
- 기획재정부, 한국개발연구원, 2008, 한국의 산림녹화 정책.
- 김기홍, 최승필, 육운수, 손홍규, 2006, GLCM기법을 이용한 전정색 위성
영상에서의 도시경계 추출, 대한토목학회논문집, 26(1D), 211-217.
- 김용전, 이찬주(Kim & Lee), 2014, 내성천의 하도변화 분석-영주댐 건설
이전(1970~2011)-, 한국지형학회지, 21(1), 17-31.
- 김지성, 이찬주, 김주훈, 최천규, 김규호, 2015, 지형학적 및 수문학적 방
법에 의한 만경강 홍수터 획정 방법 비교, *Ecology and Resilient
Infrastructure*, 2(2), 128-136.
- 동아일보, 1967, 20년의 상흔(8월 18일자 기사), 서울:동아일보사
- 박근애, 이미선, 김현준, 김성준, 2005, 시계열 항공사진과 20세기 초 지
형도를 이용한 경안천유역의 하천형태 및 하천부지 변화추세 분석,
한국수자원학회논문집, 38(5), 379-390.
- 박봉진, 장창래, 이삼희, 정관수, 2008, 댐 하류하천의 사주와 식생 면적
변화에 관한 연구, 한국수자원학회논문집, 41(12), 1163-1172.
- 배선학, 2007, 1910년대 지형도를 이용한 근대화 이후의 도시 변화 분석

- 한국지리정보학회지, 10(3), 93-103.
- 손광익, 지운, 2015, 낙동강 하도의 유사수지 분석을 통한 자연적 그리고 인위적 하상변동 분석(4대강살리기 사업 이전), 한국수자원학회논문집, 48(1), 1-8.
- 송영선, 2005, CORONA 영상을 이용한 한반도 지역 모자이크 영상 제작, 한국지형공간정보학회논문집, 13(4), 67-73.
- 우효섭, 2008, 화이트리버, 그린리버?, 한국수자원학회지-물과 미래, 41(12), 38-47.
- 우효섭, 2009, 하천에서 식생활착 연구 문헌조사-화이트리버가 그린리버로 변하는 과정의 연구(I), 한국수자원학회지-물과 미래, 42(8), 37-45.
- 우효섭, 박문형, 조강현, 조형진, 정상준, 2010, 댐 하류 충적하천에서 식생이입 및 천이-낙동강 안동/임하댐 하류하천을 중심으로-, 한국수자원학회논문집, 43(5), 455-469.
- 이광률, 김대식, 2011, 경북 내성천 하도 단면의 시계열적 변화, 한국지형학회지, 18(2), 53-63
- 이광률, 김송현, 2009, 낙동강 중·상류 내성천과 위천의 지형 및 수문 특성 비교 분석, 한국지형학회지, 16(3), 43-57.
- 이광률, 조영동, 김대식, 김중석, 정우현, 조현진, 윤국현, 2010, 경북 내성천의 하도 지형 환경 및 퇴적물 분석, 한국지역지리학회지, 16(2), 85-99.
- 이민부, 김남신, 이광률, 한옥, 2005, 위성영상을 이용한 대동강과 재령강의 하도변화 분석, 한국지형학회지, 12(1), 91-102
- 이찬주, 김동구, 2017, 영주댐 운영 전 내성천에서 하도 형태의 단기 변화, *Ecology and Resilient Infrastructure*, 4(1), 12-23
- 정충영, 최이규, 1998, SPSS WIN을 이용한 통계분석, 서울:무역경영사
- 조선총독부, 1920, 치수 및 수리답사서, 번역본
- 최광용, 권원태, Robinson, D. A., 2006, 우리나라 사계절 개시일과 지속기간, 대한지리학회지, 41(4), 435-456

- 최성욱, 윤병만, 우효섭, 조강현, 2004, 댐건설에 의한 유황변화에 따른 하류 하도에서 하천지형학적 변화 및 식생피복의 변화: 황강 합천댐 사례, **한국수자원학회논문집**, 37(1), 55-66.
- 한국건설기술연구원(KICT), 2014, 구조물로 인한 하천 지형 및 식생 변화 분석, **2014년도 주요사업 3차년도 보고서(산업계연계형)**, KICT2014-244, 207p.
- 한국건설기술연구원, 2016, 구조물로 인한 하천 지형 및 식생 변화 분석, **2016년도 주요사업 최종(5차년도 보고서)**, KICT2016-187, 89p.
- 허준, 2017, 내성천 하상 측량결과 및 환경변화 용역 진행현황, 예천 회룡포 종합정비계획 중간보고회 발표(PPT) 자료
- 홍일, 강준구, 여홍구, 2012, 영상자료를 이용한 만경강 하도변화에 관한 연구, **한국수자원학회논문집**, 45(2), 127-136.
- Alabyan, A. M., Chalov, R. S., 1998, Types of river channel patterns and their natural controls, *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 467-474.
- Andrews, E. D., 1986, Downstream effects of Flaming Gorge Reservoir on the Green River, Colorado and Utah, *Geological Society of America Bulletin*, 97, 1012-1023.
- Ashmore, P. E., 1991, Channel morphology and bed load pulses in braided gravel-bed streams, *Geografiska Annaler*, 73A, 37-52.
- Azami, K., Suzuki, H., Toki, S., 2004, Changes in riparian vegetation communities below a large dam in a monsoonal region: Futase dam, Japan, *River Research and Applications*, 20(5), 549-563.
- Baker, V. R., 1978, Adjustment of fluvial systems to climate and source terrain in tropical and subtropical environments, In Miall, A. D.(ed.), *Fluvial sedimentology*, Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 5, Calgary, 211-230.
- Beechie, T. J., Collins, B. D., Pess, G. R., 2001, Holocene and recent

- geomorphic processes, land use, and salmonid habitat in two North Puget Sound river basins, In Dorava, J. M., Montgomery, D. R., Palcsak, B. B., Fitzpatrick, F. A. (eds.) *Geomorphic Processes and Riverine Habitat*, American Geophysical Union, Washington DC., 37-54.
- Bisson, P. A., Buffington, J. M., Montgomery, D. R., 2006, Valley segments, stream reaches, and channel units, In Hauer, F. R., Lamberti, G. A., (eds.), *Methods in Stream Ecology* (Second Edition). Academic Press, San Diego, 23-49.
- Boix-Fayos, C., Barbera, G. G., Lopez-Bermudez, F., Castillo, V. M., 2007, Effects of check dams, reforestation and land-use changes on river channel morphology: Case study of the Rogativa catchment (Murcia, Spain), *Geomorphology*, 91, 103-123.
- Brandt, S. A., 2000, Classification of geomorphological effects of downstream of dams, *Catena*, 40, 375-401.
- Brice, J. C., 1960. Index for description of channel braiding, Geological Society of America Bulletin, 85, 581-586.
- Buffington, J. M., Montgomery, D. R., 2013. Geomorphic Classification of Rivers, In Wohl, E. (ed.) *Treatise on Geomorphology*, vol. 9, Fluvial Geomorphology, 730-767.
- Burkham, D. E., 1972, Channel changes of the Gila River in Safford Valley, Arizona 1946-1970, *Geological Survey Professional Paper* 655-G, 24p.
- Cadol, D., Rathburn, S. L., Cooper, D. J., 2010, Aerial photographic analysis of channel narrowing and vegetation expansion in Canyon De Chelly National Monument, Arizona, USA, 1935 - 2004, *River Research and Application*, 27(7), 841-856.
- Chang, H. H., 1986, River channel changes: adjustments of equilibrium, *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(1), 43-55.

- Choi, S. U., Yoon, B. M., Woo, H. S., 2005, Effects of Dam-Induced Flow Regime Change on Downstream River Morphology and Vegetation Cover in the Hwang River, Korea, *River Research and Applications*, 21, 315-325.
- Clery, I., Pierrot-Deseilligny, M., Vallet, B., 2014, Automatic Georeferencing of a Heritage of old analog aerial Photographs, *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. II-3, 33-40.
- Corenblit, D., Steiger J., Tabacchi, E., 2010, Biogeomorphologic succession dynamics in a Mediterranean river system, *Ecography*, 33, 1136-1148
- Fotherby, L. M., 2009, Valley confinement as a factor of braided river pattern for the Platte River, *Geomorphology*, 103, 562-576
- Friedman, J. M., Osterkamp, W. R., Lewis, W. M., 1996a, Channel Narrowing and Vegetation Development Following a Great Plains Flood, *Ecology*, 77(7), 2167-2181.
- Friedman, J. M., Osterkamp, W. R., Lewis, W. M., 1996b, The role of vegetation and bed-level fluctuations in the process of channel narrowing, *Geomorphology*, 14(4), 341-351.
- Friedman, J. M., Osterkamp, W. R., Scott, M. L., Auble, G. T., 1998, Downstream effects of dams on channel geometry and bottomland vegetation: Regional patterns in the great plains, *Wetlands*, 18(4), 619-633.
- Gendaszek, A. S., Magirl, C. S., Czuba, C. R., 2012, Geomorphic response to flow regulation and channel and floodplain alteration in the gravel-bedded Cedar River, Washington, USA, *Geomorphology*, 179, 258-268.
- Gordon, E., Meentemeyer, R. K., 2006, Effect of dam operation and land use on stream channel morphology and riparian vegetation,

- Geomorphology*, 82, 412–429.
- Grömping, U., 2006a. relaimpo: Relative Importance of Regressors in Linear Models. *R package version 1.1-1*
- Grömping, U., 2006b. Relative Importance for linear Regressors in R: the Package relaimpo, *Journal of statistical software*, 17(1), 1–27.
- Gurnell, A. M., Downward, S. R., 1994, Channel planform change on the River Dee meanders, 1876–1992, *Regulated Rivers: Research and management*, 9, 187–204
- Gurnell, A. M., Petts, G. E., 2002, Island-dominated landscapes of large floodplain rivers, a European perspective. *Freshwater Biology*, 47, 581–600
- Gurnell, A. M., Petts, G. E., 2006, Trees as riparian engineers: the Tagliamento river, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(2), 1558–1574.
- Gurnell, A. M., Tockner, K., Edwards, P., Petts, G., 2005, Effects of deposited wood on biocomplexity of river corridors. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 3(7), 377–382.
- Hervouet, A., Dunford, R., Piégay, H., Belletti, B., Trémélo, M. L., 2011, Analysis of post flood recruitment patterns in braided channel rivers at multiple scales based on an image series collected by unmanned aerial vehicles, ultra light aerial vehicles, and satellites. *GIScience and Remote Sensing*, 48(1), 50–73.
- Hickin, E., 1984, Vegetation and river channel dynamics, *Canadian Geographer*, 28, 111–124.
- Hohensinner, S., Habersack, H., Jungwirth, M., Zauner, G., 2004, Reconstruction of the characteristics of a natural alluvial river–floodplain system and hydromorphological changes following human modifications: the Danube River (1812–1991), *River Research and Applications*, 20(1), 25–41.

- Hooke, J. M., Redmond, C. E., 1989, River-channel changes in England and Wales, *Journal of IWEM*, 3, 328-335.
- Hughes, M. L., McDowell, P. F. Marcus, W. A., 2006, Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS, *Geomorphology*, 74, 1-16
- Hupp, C. R., Osterkamp, W. R., 1996, Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes, *Geomorphology* 14, 277-295.
- Johnson, J. W., Lebreton, J. M., 2004, History and Use of Relative Importance Indices in Organizational Research, *Organizational Research Methods*, 7, 238-257.
- Johnson, W. C., 1994, Woodland expansion in the Platte River, Nebraska: Patterns and causes, *Ecological Monographs*, 64(1), 45-84.
- Johnson, W. C., 1997, Equilibrium response of riparian vegetation to flow regulation in the Platte River, Nebraska. *Regulated Rivers: Research & Management*, 13, 403 - 415.
- Johnson, W. C., 2000, Tree recruitment and survival in rivers: Influence of hydrological processes. *Hydrological Processes*, 14, 3051-3074.
- Kamada, M., 2008, Process of willow community establishment and topographic change of riverbed in a warm-temperate region of Japan, In Sakio, H., Tamura, T. (eds.) *Ecology of Riparian Forests in Japan: Disturbance, Life History, and Regeneration*, Springer.
- Karabork, H, Yildiz, F., Coskun, E., 2000, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35.
- Knighton, D., 1998, *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*, Oxford University Press.

- Kondolf, G. M., 1997, Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels, *Environmental Management*, 21(4), 533-551
- Kressler, F. P., Kim, Y. S., Schiller, C., Steinnocher, K., 2006, KOMPSAT-1 AND KOMPSAT-2 from a European Perspective, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 36.
- Liebault, F., Piegay, H., 2001, Assessment of channel changes due to long-term bedload supply decrease, Roubion River, France, *Geomorphology*, 36, 167-186.
- Liebault, F., Piegay, H., 2002, Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of Southeastern France, *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 425-444.
- Lue, Y., 1996, Towards a higher level of automation for SoftPlotter, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31, Part B3, 478-483
- Marston R. A., Girel, J., Pautou, G., Piegay, H., Bravard, J., Arneson, C., 1995, Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France, *Geomorphology*, 13, 121-131.
- Matthai, H. F., 1969, Floods of June 1965 in South Platte River basin, Colorado, *USGS Water Supply Paper*, 1850-B, 64p.
- McDonald, R. A., 1995, Corona: success for space reconnaissance, a look into the Cold War, and a revolution in intelligence, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 61(6), 689-720.
- Mosley, P. M., 1981, Semi-determinate hydraulic geometry of river channels, South Island, New Zealand, *Earth surface Processes and Landforms*, 6, 127-137.
- Mueller, J. E., 1968, Introduction to hydraulic and topographic

- sinuosity indexes, *Annals of the Association of American Geographers*, 58, 371–385.
- Murray, A. B., Paola, C., 2003, Modelling the effect of vegetation on channel pattern in bedload rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 131–143.
- Nanson, G. C., Croke, J. C., 1992, A genetic classification of floodplains, *Geomorphology*, 4, 459–486.
- Nardi, L., Rinaldi, M., 2015, Spatio-temporal patterns of channel changes in response to a major flood event: the case of the Magra River (central - northern Italy), *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(3), 326–339.
- Osterkamp, W. R., Hedman, E. R., 1981, Channel geometry of regulated streams in Kansas as related to mean discharge, 1970–1980: *Kansas Water Office Technical Report* 15, 32p.
- Peiry, J. L., 1987, Channel degradation in the Middle Arve River, France, *Regulated Rivers: Research and Management*, 1, 183–188.
- R Development Core Team, 2017, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, <http://www.R-project.org/>.
- Räpple, B., Piégay, H., Stella, J. C., Mercier, D., 2017, What drives riparian vegetation encroachment in braided river channels at patch to reach scales? Insight from annual airborne surveys (Drôme River, SE France, 2005–2011), *Ecohydrology*, 10(8)
- Richards, K., 1982, *Rivers: Form and Processes in Alluvial Channels*, New York, Methuen.
- Rinaldi, M., 2003, Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, central Italy, *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(6), 587–608.
- Rosgen, D. L., 1996, *Applied River Morphology*. Hilton Lee Silvey,

- Lakewood.
- Rust, B. R., 1978, A classification of alluvial channel systems. In Miall, A. D. (ed.) *Fluvial Sedimentology*, Canadian Society of Petroleum Geologist, Alberta, 187–198.
- Schumm, S. A., 1977, *The fluvial system*, Wiley-Interscience, New York.
- Schumm, S. A., Lichty, R. W., 1963, Channel widening and flood-plain construction along Cimarron River in Southwestern Kansas, *Geological Survey Professional Paper* 352-D, 71–88.
- Sedell, J. R., Froggatt, J. L., 1984. Importance of streamside vegetation to large rivers: the isolation of the Willamette River, Oregon, USA from its floodplain by snagging and streamside forest removal. *Internationale Veriningung für Theoretische and Angewandte Limnologie Verhandlungen*, 22, 1828–1834.
- Shimize, E., Fuse, T., 2003, Rubber-Sheeting of Historical Maps in GIS and Its Application to Landscape Visualization of Old-time Cities: Focusing on Tokyo of the Past, *Proceedings of the 8th international conference on computers in urban planning and urban management*, 27–29 May 2003, Sendai, Japan
- Surian, N., 1999, Channel changes due to river regulation: The case of the Piave River Italy, *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 1135–1151.
- Swanson, B. J., Meyer, G. A., Coonrod, J. E., 2011, Historical channel narrowing along the Rio Grande near Albuquerque, New Mexico in response to peak discharge reductions and engineering: magnitude and uncertainty of change from air photo measurements, *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(7), 885–900.
- Tal, M., Gran, K., Murray, A. B., Paola, C., Hicks, D. M., 2004,

- Riparian vegetation as a primary control on channel characteristics in multithread rivers. In: Bennett, S. J., Simon, A. (eds.), *Riparian vegetation and fluvial geomorphology*. Water Science Application, 8, 43–58.
- Toone, J., Rice, S. P., Piégay, H., 2014, Spatial discontinuity and temporal evolution of channel morphology along a mixed bedrock alluvial river, upper Drôme River, southeast France: Contingent responses to external and internal controls. *Geomorphology*, 205, 5–16.
- VanLooy, J. A., Martin, C. W., 2005, Channel and vegetation change on the Cimarron River, Southwestern Kansas, 1953–2001, *Annals of the Association of American Geographers*, 95(4), 727–739.
- Wang, H., Ellis, E. C., 2005, Spatial accuracy of orthorectified IKONOS imagery and historical aerial photographs across five sites in China, *International Journal of Remote Sensing*, 26(9), 1893–1911.
- Warner, R. F., 2000, Gross channel changes along the Durance River, Souther France, over the last 100 years using cartographic data, *Regulated Rivers: Research and management*, 16, 141–157.
- White, M. S., Griffin, P., 1985, Piecewise linear rubber-sheet map transformations, *The American Cartographer*, 12(2), 123–131.
- Williams, G. P., 1978, The case of the shrinking channels—the North Platte and Platte Rivers in Nebraska, *Geological Survey Circular* 781, 48p.
- Williams, G. P., Wolman, M. G., 1984, Downstream effects of dams on alluvial channels, *USGS Professional Paper* 1286
- Winterbottom, S. J., 2000, Medium and short-term channel planform changes on the River Tay and Tummer, Scotland, *Geomorphology*, 34, 195–208

戸田祐嗣, 古川智文, 辻本哲郎(Toda, Y., Furukawa, T., Tsujimoto, T.),
2012, Comparative study on long term change of riparian
vegetation in class-A rivers in Chubu Region by using aerial
photograph analysis, 河川技術論文集, 18巻

Abstract

Analysis on Long-term Channel Change of the Naeseong Stream

- In terms of Geomorphology and Land
Surface Cover -

Chanjoo Lee

Department of Geography Education

The Graduate School

Seoul National University

The Naeseong Stream is a sand-bed river, which had long maintained its characteristics before 2016 as a non-regulated channel and has attracted social concern. Since 2016, it was changed to a regulated river together with water impoundment by Youngju dam and it is predicted to undergo consequent changes in geomorphology and landscape such as riverbed degradation, vegetation establishment and channel narrowing. These can also be caused through adjustment processes in which a river to adapt itself to the changes in controlling factors including climate, watershed land cover and

in-channel human disturbances. The purpose of this study is to investigate the changes of the Naeseong Stream in terms of geomorphology and land surface cover using the data relevant to the last 100 years, to discuss interaction between channel change and controlling factors, and to provide desirable directions on river management.

For this, quantitative analysis on the channel morphology of the Naeseong Stream was carried out using spatial data during 1913~2013. The result indicates that geomorphic changes including decrease of low water channel sinuosity, increase of braiding, channel narrowing and riverbed degradation happened so far along the downstream sub-reaches such as R01, R03~R07, which have relatively larger riverine space. Most remarkable change appeared in channel narrowing and riverbed degradation. These were caused directly by decrease of sediment discharge which is inferred to be caused by both in-channel sand mining and reduction of sediment yield in watershed due to forestation.

Change of the land surface cover in the Naeseong Stream is investigated using aerial photographs for the period of 1965~2016. The result shows that change in land surface cover happened spatially along the downstream sub-reaches of R01, R03~R08. Three periods are differentiated: i) so-called 'white river' period before 1986/87, ii) the first expansion of vegetation beginning from 1987 and lasting to 2013, iii) the second expansion since 2013, which enveloped both down- and upstream sub-reaches. Expansion of vegetation area

has been achieved by i) the processes concerning formation of vegetated mid-channel bars into islands building and ii) vegetation establishment on marginal subaerial areas of less frequent inundation. Examples of rapid increase that happened in 1986/87 and 2016 indicate vegetation establishment could be made in a non-regulated river by the processes i) during the years of weak or no flood together with high spring temperature.

Multiple regression analysis was conducted to quantitatively evaluate major factors which brought into change of land surface cover due to vegetation establishment. From the analysis, June to July discharge reflecting flow in the beginning part of rainy season and rainfall of the same period as a substitute for discharge, and mean air temperature of April to June which means earlier part of plant growing season are proved to be main independent variables which affect variation of vegetation area. Width of 1965 represents a geomorphic variable explaining spatial difference between the downstream (R01, R03~R08) and upstream (R02, R09~R13) sub-reaches. These results show that hydrological variables have effects on vegetation establishment by intervening physical processes, climatic variables by intervening biological processes, and geomorphic by acting as spatial confinement.

The results of this study indicate that interaction between hydrology, vegetation and geomorphology has been actively made in the Naeseong Stream, a sand-bed braided river with large riverine space and hydrological fluctuation. Therefore, for desirable and

sustainable management of river, management scheme should be designed based on the understanding of the interaction.

Keywords : the Naeseong Stream, channel change, fluvial geomorphology, land surface cover, vegetation establishment, river management

Student Number : 2013-30438

부 록

Table A-1 Area ratio of each land surface cover type

Subreach	Year	Natural					Man-induced			
		OWN	BAN	BAV	VGH	VGt	HUC	HUP	BAC	OWE
R01	1954	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	1965	45.8	50.8	0.0	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1971	56.4	38.8	0.2	4.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
	1974	55.2	39.9	0.6	3.3	0.6	0.4	0.0	0.0	0.0
	1979	68.9	20.2	0.0	4.8	0.7	2.3	3.1	0.0	0.0
	1980	66.7	24.0	0.0	3.7	1.8	0.7	3.2	0.0	0.0
	1986	61.0	19.4	0.0	7.4	4.7	3.1	4.3	0.0	0.0
	1988	49.4	33.3	0.0	6.1	4.0	0.5	3.3	0.3	3.1
	1991	58.8	24.9	0.0	8.6	3.5	1.7	2.5	0.0	0.0
	1995	37.1	44.0	0.3	15.5	1.9	1.1	0.0	0.1	0.0
	1996	44.6	31.0	0.0	21.4	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0
	2000	51.6	29.1	0.0	18.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0
	2005	51.4	29.6	0.0	12.9	0.0	6.1	0.0	0.0	0.0
	2008	35.8	43.1	0.0	13.6	0.0	5.1	0.0	2.5	0.0
	2010	48.9	26.7	0.1	16.5	0.7	6.2	0.0	0.5	0.3
	2013	47.8	24.3	0.0	20.6	0.9	6.6	0.0	0.0	0.0
	2016	33.9	3.6	7.5	44.8	1.1	6.7	0.0	2.5	0.0
R02	1954	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	1965	44.2	54.7	0.0	0.3	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0
	1971	60.4	38.1	0.0	0.1	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0
	1974	58.3	40.1	0.0	0.0	0.0	1.3	0.3	0.0	0.0
	1979	63.9	34.1	0.0	0.4	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0
	1980	64.8	32.8	0.0	0.5	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0
	1986	62.2	30.8	0.0	2.6	0.7	3.6	0.0	0.0	0.0
	1988	50.8	42.3	0.0	3.5	0.4	3.1	0.0	0.0	0.0
	1991	58.8	37.3	0.0	1.4	0.4	0.5	0.0	1.8	0.2
	1995	40.6	55.6	0.0	1.4	1.6	0.7	0.0	0.0	0.0
	1996	48.2	46.5	0.2	3.7	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0
	2000	47.8	46.5	0.0	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2005	52.7	39.2	0.1	6.5	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0
	2008	36.5	56.0	0.0	7.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2010	51.5	40.1	0.0	8.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
	2013	53.1	36.7	0.0	10.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2016	37.7	21.8	9.4	31.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

Table A-1 (Continued)

Subreach	Year	Natural					Man-induced			
		OWN	BAN	BAV	VGH	VGt	HUC	HUP	BAC	OWE
R03	1954	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	1965	52.1	44.7	0.0	3.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
	1971	69.6	26.8	0.2	2.9	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0
	1974	71.2	23.4	0.0	0.7	0.0	2.6	2.1	0.0	0.0
	1979	71.6	16.7	0.0	1.7	1.7	2.7	5.2	0.5	0.0
	1980	67.0	21.9	0.2	1.3	1.3	2.3	5.4	0.5	0.0
	1986	51.8	32.8	0.0	3.3	4.2	3.4	4.3	0.2	0.0
	1988	47.1	39.1	0.0	2.4	4.7	1.9	3.6	1.1	0.0
	1991	63.5	29.2	0.0	6.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.2
	1995	34.2	45.2	0.5	18.4	1.1	0.4	0.0	0.1	0.0
	1996	42.1	29.4	0.1	28.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
	2000	36.5	33.9	0.0	27.2	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0
	2005	36.7	31.0	0.0	20.9	1.3	0.0	10.0	0.0	0.0
	2008	23.3	43.9	0.1	23.5	0.1	0.0	7.0	1.7	0.3
	2010	38.9	26.2	0.1	25.0	1.2	0.0	6.4	2.1	0.0
	2013	37.5	20.5	0.0	31.9	0.5	0.0	9.7	0.0	0.0
	2016	24.3	10.7	5.1	50.8	0.5	0.0	8.7	0.0	0.0
R04	1954	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	1965	67.8	30.5	0.0	0.9	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0
	1971	77.5	20.8	0.0	1.4	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
	1974	77.2	12.3	0.0	0.6	0.2	0.0	2.4	7.5	0.0
	1979	81.7	15.1	0.0	1.2	0.2	0.0	1.8	0.0	0.0
	1980	80.1	16.7	0.1	1.3	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0
	1986	59.2	26.4	0.0	5.4	7.3	0.0	1.6	0.0	0.0
	1988	44.2	44.6	0.0	3.5	5.7	0.0	2.1	0.0	0.0
	1991	62.5	31.4	0.0	3.7	2.3	0.0	0.0	0.0	0.1
	1995	32.7	45.8	0.2	21.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
	1996	39.2	33.3	0.0	27.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
	2000	33.0	41.1	0.0	25.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2005	42.2	29.2	0.0	28.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
	2008	35.2	34.4	0.1	24.1	0.2	0.0	4.4	1.7	0.0
	2010	42.0	21.5	0.1	25.6	1.1	0.8	6.8	2.0	0.1
	2013	37.3	19.9	0.0	40.8	0.4	0.6	0.9	0.1	0.0
	2016	19.6	9.1	3.2	64.3	0.5	0.6	2.0	0.4	0.3

Table A-1 (Continued)

Subreach	Year	Natural					Man-induced			
		OWN	BAN	BAV	VGH	VGT	HUC	HUP	BAC	OWE
R05	1954	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	1965	57.1	34.2	0.0	4.8	0.0	3.9	0.0	0.0	0.0
	1971	63.0	21.0	0.1	12.2	0.4	2.8	0.6	0.0	0.0
	1974	69.4	12.3	0.1	7.3	2.8	4.1	3.9	0.1	0.0
	1979	69.8	8.3	0.0	5.8	7.8	4.6	3.8	0.0	0.0
	1980	67.6	10.4	0.0	5.4	8.3	4.1	4.2	0.0	0.0
	1986	49.8	16.8	0.0	15.5	13.9	1.0	1.8	1.2	0.0
	1988	43.8	31.5	0.0	7.0	16.4	1.3	0.0	0.1	0.0
	1991	49.7	22.7	0.0	17.8	7.6	0.5	1.7	0.0	0.0
	1995	30.0	42.3	0.4	8.4	0.7	0.2	0.0	17.3	0.7
	1996	37.9	31.6	0.0	28.3	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0
	2000	38.8	22.0	0.0	39.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2005	32.9	23.7	0.0	31.9	5.6	2.0	0.0	1.7	2.3
	2008	29.2	31.8	0.6	22.2	0.0	0.4	0.0	10.8	5.1
	2010	24.0	29.4	0.1	35.6	0.1	6.6	0.0	4.3	0.0
	2013	30.3	12.9	0.0	41.0	0.3	10.3	5.3	0.0	0.0
	2016	17.1	3.4	2.7	57.5	0.5	11.9	5.8	0.8	0.3
R06	1954	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	1965	39.4	60.1	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
	1971	52.3	44.8	0.0	2.4	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0
	1974	48.6	46.6	0.0	1.6	1.1	0.4	1.6	0.0	0.0
	1979	61.2	27.9	0.0	1.9	1.7	1.3	6.0	0.0	0.0
	1980	56.0	32.8	0.0	1.2	1.2	0.1	8.7	0.0	0.0
	1986	54.0	27.1	0.0	4.9	6.3	5.1	1.9	0.3	0.4
	1988	44.1	35.0	0.0	5.8	4.6	3.3	0.6	5.7	1.0
	1991	45.2	42.3	0.0	7.1	2.3	2.4	0.6	0.0	0.0
	1995	29.6	49.6	0.1	9.1	2.2	9.1	0.0	0.3	0.0
	1996	33.5	40.5	0.1	13.0	0.6	11.4	0.0	0.9	0.0
	2000	48.1	30.5	0.0	10.0	0.0	11.4	0.0	0.0	0.0
	2005	50.9	30.0	1.0	12.7	0.3	5.1	0.0	0.0	0.0
	2008	40.6	39.8	0.2	12.3	0.1	6.0	0.0	0.7	0.3
	2010	25.6	52.8	0.0	12.9	0.0	8.7	0.0	0.0	0.0
	2013	46.9	26.1	0.0	14.2	0.1	12.8	0.0	0.0	0.0
	2016	21.1	10.9	6.3	51.7	0.2	4.5	0.0	5.2	0.2

Table A-1 (Continued)

Subreach	Year	Natural					Man-induced			
		OWN	BAN	BAV	VGH	VGT	HUC	HUP	BAC	OWE
R07	1954	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	1965	56.9	34.7	0.0	2.8	0.0	5.5	0.0	0.0	0.0
	1971	65.3	21.6	0.2	3.6	1.9	6.4	1.0	0.0	0.0
	1974	69.3	14.6	0.0	2.9	3.3	6.4	3.5	0.0	0.0
	1979	67.8	11.7	0.0	4.8	2.4	8.4	5.0	0.0	0.0
	1980	62.8	15.9	0.1	5.5	2.1	8.6	5.1	0.0	0.0
	1986	53.9	12.3	0.0	5.3	15.9	7.5	5.0	0.1	0.0
	1988	33.6	38.6	0.0	2.1	12.7	6.0	4.5	2.6	0.0
	1991	50.6	33.6	0.0	12.1	1.4	0.3	1.9	0.0	0.0
	1995	21.9	45.3	0.3	23.0	0.3	1.2	1.1	6.8	0.2
	1996	36.6	21.9	0.2	34.8	0.2	1.7	0.2	4.2	0.2
	2000	36.6	29.4	0.0	31.0	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0
	2005	43.7	27.0	0.9	26.9	0.6	0.8	0.0	0.0	0.1
	2008	38.1	27.1	0.3	10.4	0.1	1.4	0.0	20.2	2.2
	2010	25.7	44.1	0.1	27.8	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0
	2013	37.4	22.1	0.0	33.5	3.2	3.6	0.0	0.2	0.0
	2016	19.2	7.2	9.9	56.4	2.7	4.2	0.0	0.7	0.0
R08	1954	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	1965	39.7	60.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1971	47.3	50.8	0.6	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1974	50.2	47.6	0.0	1.4	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0
	1979	65.3	23.1	0.0	1.0	0.8	0.0	9.7	0.0	0.0
	1980	56.9	31.2	0.1	1.2	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0
	1986	63.7	21.0	0.2	11.4	1.7	0.0	0.8	1.2	0.0
	1988	33.8	55.1	0.0	8.7	0.2	0.0	2.2	0.0	0.0
	1991	50.3	45.3	0.0	3.7	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
	1995	31.7	57.9	0.1	6.9	0.0	0.0	0.0	0.3	3.1
	1996	40.0	36.3	0.2	12.3	0.0	0.1	0.0	9.0	2.2
	2000	49.0	34.8	0.0	16.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2005	47.3	36.6	0.1	15.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
	2008	29.1	41.9	0.1	0.4	0.0	0.1	0.0	28.3	0.1
	2010	32.6	42.2	0.2	23.1	0.0	0.4	0.0	1.1	0.4
	2013	43.0	25.1	0.0	27.6	0.8	0.4	3.1	0.1	0.0
	2016	24.1	21.3	6.5	35.1	0.5	0.4	0.0	12.2	0.1

Table A-1 (Continued)

Subreach	Year	Natural					Man-induced			
		OWN	BAN	BAV	VGH	VGT	HUC	HUP	BAC	OWE
R09	1954	42.4	57.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1965	38.8	60.9	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1971	46.1	52.1	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1974	53.3	45.8	0.0	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	1979	61.9	35.7	0.0	1.8	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0
	1980	50.5	47.6	0.0	1.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
	1986	63.1	34.0	0.0	2.2	0.6	0.1	0.0	0.1	0.0
	1988	43.9	54.3	0.0	1.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
	1991	47.8	50.7	0.0	1.1	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0
	1995	41.4	56.3	0.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1996	44.0	52.1	0.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2000	52.6	43.1	0.0	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2005	42.8	52.8	0.1	2.4	0.4	1.2	0.0	0.0	0.3
	2008	37.3	56.2	0.3	3.9	0.0	1.8	0.0	0.5	0.0
	2010	41.6	48.9	0.0	5.9	0.0	3.1	0.0	0.1	0.3
	2013	56.3	30.7	0.1	10.4	0.1	2.4	0.0	0.0	0.0
	2016	31.8	40.2	3.2	21.6	0.1	3.1	0.0	0.0	0.0
R10	1954	44.7	53.7	0.0	1.3	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
	1965	50.1	49.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1971	60.7	38.8	0.0	0.4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
	1974	61.4	38.1	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
	1979	80.6	18.5	0.0	0.7	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
	1980	67.6	31.7	0.0	0.5	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
	1986	84.3	9.8	0.0	3.5	2.3	0.1	0.0	0.0	0.0
	1988	50.3	47.5	0.0	0.5	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0
	1991	67.5	30.7	0.0	1.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	1995	44.5	49.7	0.1	3.4	0.4	0.0	0.0	1.2	0.7
	1996	47.6	42.0	0.3	7.3	0.0	0.0	0.0	1.9	0.9
	2000	50.2	46.7	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2005	41.0	53.3	0.0	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2008	34.9	56.1	0.8	7.6	0.0	0.0	0.0	0.4	0.2
	2010	32.0	50.7	0.2	13.3	0.0	0.7	0.0	2.7	0.5
	2013	58.8	22.1	0.0	18.5	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0
	2016	22.1	24.3	6.8	44.2	0.2	0.9	0.0	1.7	0.2

Table A-1 (Continued)

Subreach	Year	Natural					Man-induced			
		OWN	BAN	BAV	VGH	VGT	HUC	HUP	BAC	OWE
R11	1954	41.6	58.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1965	43.1	56.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1971	56.5	43.1	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1974	58.8	40.9	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	1979	61.0	38.6	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
	1980	49.8	49.7	0.0	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
	1986	80.5	18.2	0.0	0.7	0.4	0.0	0.0	0.2	0.0
	1988	45.4	54.1	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
	1991	44.7	54.3	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
	1995	40.2	57.9	0.0	1.3	0.5	0.0	0.0	0.1	0.0
	1996	45.1	52.1	0.1	2.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
	2000	50.8	48.4	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2005	37.6	59.0	0.1	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6
	2008	32.5	62.4	0.4	1.7	0.4	0.1	0.0	2.5	0.0
	2010	37.7	56.8	0.2	4.3	0.6	0.2	0.0	0.2	0.0
	2013	61.6	32.4	0.0	5.3	0.6	0.0	0.0	0.1	0.0
	2016	33.4	46.6	2.4	16.6	0.7	0.1	0.0	0.2	0.0
R12	1954	37.5	62.2	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1965	49.2	50.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1971	49.4	50.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1974	55.3	44.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1979	78.2	21.7	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1980	62.0	38.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1986	67.0	30.9	0.0	2.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	1988	43.5	56.4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1991	47.8	50.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3
	1995	40.9	57.3	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3
	1996	53.6	41.9	0.1	1.4	0.0	0.0	0.0	2.9	0.1
	2000	48.1	51.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2005	40.1	58.3	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
	2008	41.4	56.3	0.5	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
	2010	39.3	56.6	0.2	3.8	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
	2013	67.5	25.3	0.1	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2016	31.5	41.8	3.9	22.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0

Table A-1 (Continued)

Subreach	Year	Natural					Man-induced			
		OWN	BAN	BAV	VGH	VGt	HUC	HUP	BAC	OWE
R13	1954	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	1965	37.2	62.4	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1971	51.1	45.8	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1974	56.5	42.9	0.1	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	1979	63.4	34.8	0.0	0.3	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0
	1980	53.4	45.6	0.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1986	56.1	38.6	0.0	4.1	0.2	1.1	0.0	0.0	0.0
	1988	40.3	58.2	0.0	0.3	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0
	1991	51.1	47.7	0.0	1.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
	1995	43.4	54.1	0.3	1.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
	1996	44.4	45.3	0.1	2.4	0.8	0.0	0.0	4.4	2.6
	2000	29.8	68.6	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2005	43.6	51.0	0.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.5	2.6
	2008	32.7	43.8	0.4	4.3	0.1	1.1	0.0	12.4	5.2
	2010	42.1	49.2	0.2	7.0	0.4	1.1	0.0	0.0	0.0
	2013	62.9	27.8	0.0	7.6	0.4	1.2	0.0	0.0	0.0
	2016	32.5	39.9	3.5	23.3	0.3	0.8	0.0	0.0	0.0